

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

**REALIZACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE PRESIÓN DE
UN DEPÓSITO NEUMÁTICO**

AUTOR: JOSE ANTONIO SALGADO PILAR

TUTORA: CONCEPCIÓN ALICIA MONJE MIRACHET

DIRECTOR: RAMÓN IGNACIO BARBER CASTAÑO

16 de junio de 2010



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de ingeniería de sistemas
y automática

PROYECTO FIN DE CARRERA

REALIZACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE PRESIÓN DE UN DEPÓSITO NEUMÁTICO

Autor: José Antonio Salgado Pilar

Tutor: Concepción Alicia Monje Mirachet

Director: Ramón Ignacio Barber Castaño

Leganés, junio de 2010

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a todas las personas que me han acompañado durante esta etapa de mi vida que culmina con este proyecto.

En primer lugar a mis padres, José y Consuelo, por todo lo que me han ayudado, la paciencia que han sabido tener conmigo y la oportunidad que me han brindado de poder estudiar esta carrera.

A mis amigos del barrio con quien he compartido y compartiré tantos momentos especiales y que tanto me han apoyado, sin dar nombre, daros todos por agradecidos.

A todos mis compañeros de la universidad, los que terminaron y los que están, con quienes he compartido horas y horas de clases, prácticas, trabajos y días de biblioteca.

A todos mis compañeros de trabajo y a la empresa, por ayudarme a finalizar mi formación y darme la oportunidad de comenzar a trabajar en lo que en estos años he estado estudiado.

A mi tutora Concha y a Ramón por ayudarme a hacer posible este trabajo y por los consejos acumulados.

Y por ultimo quería hacer una mención especial a mi abuela Sofía *“porque esto si era preciso”*.

José Antonio Salgado Pilar

14 de junio de 2010.

Índice general

1.	INTRODUCCIÓN	13
1.1.	Motivación.	13
1.2.	Objetivos del proyecto.....	14
1.3.	Estructura del documento	15
2.	ANTECEDENTES SOBRE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS SCADA.....	16
2.1.	Antecedentes generales sobre la automatización.	16
2.1.1.	El desarrollo de las técnicas frecuenciales.....	17
2.1.2.	Avances durante la Segunda Guerra Mundial.	21
2.1.3.	Albores de la era espacial.	22
2.1.4.	Los años clásicos: 1945-1955	24
2.1.5.	Primeros pasos del control por computador.....	25
2.1.6.	Teoría moderna de control.	26
2.2.	Antecedentes generales sobre sistemas SCADA.	29
3.	MONTAJE DEL SISTEMA.....	35
3.1.	Introducción.....	35
3.2.	Sistema neumático	35
3.2.1.	Filtro-regulador	36
3.2.2.	Distribuidor	37
3.2.3.	Válvula proporcional 5 vías, 3 posiciones	38
3.2.4.	Manómetros	40
3.2.5.	Acumulador neumático	41
3.2.6.	Sensor analógico de presión	41
3.3.	Sistema de control, supervisión y adquisición de datos.....	43
3.3.1.	Controlador Lógico Programable (PLC).....	44

3.3.2. Supervisión de control y adquisición de datos (SCADA).....	46
4. HARDWARE Y SOFTWARE EN SISTEMAS SCADA	48
4.1. Introducción.....	48
4.2. Hardware	49
4.2.1. Introducción	49
4.2.2. Elementos utilizados	49
4.3. Software.....	53
4.3.1. Introducción	53
4.3.2. Elementos utilizados	54
5. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA SCADA.....	57
5.1. Introducción.....	57
5.2. Programación del PLC	57
5.3. Configuración del sistema SCADA.....	61
5.3.1. Creación de variables	66
5.3.2. Desarrollo de la imagen de proceso	72
5.3.2.a. Indicador manométrico	77
5.3.2.b. Depósito neumático.....	79
5.3.2.c. Válvula proporcional.....	80
5.3.2.d. Gráfico representativo de las presiones en función del tiempo	82
5.3.2.e. Control del regulador PID	84
5.3.2.f. Panel de presión	89
5.3.2.g. Tuberías y escape de aire.....	93
6. RESULTADOS OBTENIDOS	95
6.1. Introducción.....	95
6.2. Regulación PID	95
6.3. Respuesta ante cambios de presión	97
6.3.1. Comportamiento exacto	98
6.3.2. Área de advertencia, de peligro y alcance de valor máximo.....	98
6.3.3. Comportamiento en llenado y vaciado del sistema	100



6.3.4. Comportamiento dinámico del sistema	102
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	104
7.1. Conclusiones	104
7.2. Trabajos futuros.....	105
Glosario	107
Bibliografía	108

Índice de figuras

Figura 1: Panel de control clásico.	30
Figura 2: Panel de control moderno	30
Figura 3: Sala de control de planta.	31
Figura 3.1: Montaje neumático.	35
Figura 3.2: Esquema neumático.	36
Figura 3.3: Aspecto físico del filtro-regulador.	36
Figura 3.4: Esquema del filtro-regulador.	37
Figura 3.5: Aspecto físico del distribuidor.	37
Figura 3.6: Esquema del Distribuidor	38
Figura 3.7: Aspecto físico de la válvula proporcional 5/3.	38
Figura 3.8: Caudal en función de la tensión.	39
Figura 3.9: Conexiones eléctricas de la válvula.	39
Figura 3.10: Esquema válvula proporcional 5/3.	40
Figura 3.11: Aspecto físico del manómetro.	40
Figura 3.12: Esquema del manómetro.	41
Figura 3.13: Aspecto físico del acumulador neumático.	41
Figura 3.14: Esquema del acumulador.	41
Figura 3.15: Aspecto físico del sensor de presión.	42
Figura 3.16: Corriente y tensión de salida en función de la presión.	42
Figura 3.17: Conexiones eléctricas del sensor analógico de presión.	43
Figura 3.18: Esquema del sensor de presión analógico.	43
Figura 3.19: Aspecto físico de S7-300 314C-2 DP.	44
Figura 3.20: Aspecto físico de la fuente PS 307 2A.	46
Figura 3.21: Programa SCADA.	47
Figura 4.1: Explicación de SCADA	48
Figura 4.2: Pantalla LCD	50
Figura 4.3: Comunicación CPU-PLC.	51
Figura 4.4: PC Adapter USB.	51
Figura 4.5: Aspecto general de la aplicación de desarrollo de WinCC Flexible 2008.	54
Figura 5.1: Diagrama de bloques de un regulador PID	58
Figura 5.2: Bloque de funciones FB41 del regulador PID.	59
Figura 5.3: Transformación de valor de periferia a real.	60
Figura 5.4: Escalado lineal del valor real de periferia.	60
Figura 5.5: Determinación de la posición de la válvula proporcional.	61

Figura 5.6: Versiones de WinCC Flexible y sistemas de destino.....	62
Figura 5.7: Creación de un proyecto nuevo con el asistente de WinCC Flexible.	63
Figura 5.8: Selección del tipo de proyecto con el asistente de WinCC Flexible.	63
Figura 5.9: Selección del panel de operador, tipo de conexión y controlador.	64
Figura 5.10: Información del proyecto que se va a crear.	65
Figura 5.11: Elementos del programa WinCC Flexible Advance.....	66
Figura 5.12: Ventana de resultados.....	66
Figura 5.13: Agregar variable.....	67
Figura 5.14: Configuración General de variables.....	67
Figura 5.15: Configuración de cambio de valor por escala lineal de variables.	68
Figura 5.16: Configuración de límites de valor de la variable "Vconsigna2".....	69
Figura 5.17: Gráfica que muestra la linealización de la variable "sensor".	70
Figura 5.18: Configuración de la linealización de la variable "sensor".....	70
Figura 5.19: Fijar valor "Vconsigna2"=0 al activar la variable "RESET".	71
Figura 5.20: Asignación de un valor inicial para las variables.	71
Figura 5.21: Imagen inicial.	73
Figura 5.22: Objetos básicos para introducir en la imagen.	73
Figura 5.23: Aspecto general del panel de operador.	76
Figura 5.24: Configuración General del manómetro.	77
Figura 5.25: Configuración de la Representación del indicador manómetro.	78
Figura 5.26: Configuración de la escala del manómetro.	78
Figura 5.27: Configuración general del display del manómetro.	79
Figura 5.28: Imagen representativa del depósito neumático.	79
Figura 5.29: Configuración general del gráfico del depósito.....	80
Figura 5.30: Configuración de la barra del depósito.	80
Figura 5.31: Gráfico de la válvula proporcional.....	81
Figura 5.32: Gráficos indicadores de estado de la válvula proporcional.....	81
Figura 5.33: Configuración de la visibilidad del símbolo de llenado.	82
Figura 5.34: Configuración de las curvas del visualizador.	83
Figura 5.35: Configuración general del visualizador de curvas.	83
Figura 5.36: Leyenda del visualizador de curvas.	83
Figura 5.37: Aspecto del control del regulador PID.....	84
Figura 5.38: Configuración de los botones de las acciones PID.	84
Figura 5.39: Configuración del indicador de color para los botones de las acciones PID.....	85
Figura 5.40: Configuración General de los campos ES para los parámetros PID.	86
Figura 5.41: Configuración del Evento de los campos ES para los parámetros PID..	86
Figura 5.42: Configuración al hacer clic del botón de modo manual.	87
Figura 5.43: Cartel informativo del modo manual.	88

Figura 5.44: Configuración de la visibilidad del cartel informativo de control manual.	88
Figura 5.45: Aspecto de la expresión matemática del regulador PID mostrada.	89
Figura 5.46: Configuración del parpadeo de la expresión matemática del regulador PID mostrada.	89
Figura 5.47: Aspecto de los controles de presión.	89
Figura 5.48: Configuración para desactivar los controles de presión.	90
Figura 5.49: Configuración para ocultar los controles de presión.	90
Figura 5.50: Configuración al pulsar el botón de vaciado.	91
Figura 5.51: Configuración al soltar el botón de vaciado.	91
Figura 5.52: Configuración del Evento al hacer clic en botón -.	91
Figura 5.53: Configuración del Evento al hacer clic en el botón de llenado.	92
Figura 5.54: Configuración General del Display de control de presión.	92
Figura 5.55: Configuración de eventos del Display de control de presión.	93
Figura 5.56: Tuberías y escape del circuito neumático.	94
Figura 6.1: Comportamiento con regulador P con $K_p=2$ y $K_p=8$	96
Figura 6.2: Comportamiento del sistema con un regulador P y $K_p=50$	96
Figura 6.3: Comparación del comportamiento del sistema con un regulador P y con un regulador PI.	96
Figura 6.4: Comportamiento del sistema con un regulador PI con $K_p = 8$ y $T_i = 900$ ms.	97
Figura 6.5: Comportamiento del sistema con un regulado PD y un PID.	97
Figura 6.6: Comportamiento exacto del sistema.	98
Figura 6.7: Paso de área normal a área de advertencia (3,49 a 3,5 bar).	99
Figura 6.8: Paso del área de advertencia al área de peligro (4,24 a 4,25 bar)	99
Figura 6.9: Aspecto del panel cuando se alcanza el máximo de presión.	100
Figura 6.10: Comportamiento en el llenado.	101
Figura 6.11: Comportamiento en el vaciado.	102
Figura 6.12: Comportamiento en el aumento de presión en escalones.	102
Figura 6.13: Comportamiento en la disminución de presión.	103
Figura 6.14: Comportamiento ante cambios bruscos.	103

Índice de tablas

Tabla 3.1: Conexiones de la válvula proporcional 5/3.....	40
Tabla 3.2: Conexiones del sensor analógico de presión.....	43
Tabla 4.1: Perfiles de bus soportados y velocidades de transferencia.....	52
Tabla 5.1: Configuración de variables del sistema.	68
Tabla 5.2: Valores de sensor para distintas presiones.	69
Tabla 5.3: Objetos básicos.	75
Tabla 5.4: Objetos ampliados.	76

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación.

El aire comprimido lleva siglos acompañando al hombre y ha sido utilizado como fuente de energía para diversos usos. Aunque parezca algo relativamente más moderno, la primera aplicación documentada de aire comprimido viene del siglo III a.C. en la antigua Grecia. El inventor Ktesibios, utilizó esta tecnología para propulsar una catapulta. El primer libro que trata sobre el empleo del aire comprimido para accionar diferentes mecanismos está datado en el siglo I d.C.

De la antigua Grecia procede la expresión “Pneuma”, que designa la respiración, el viento, y de manera filosófica el alma. La derivación de esta palabra dio origen al actual concepto de Neumática, que trata los movimientos y procesos del aire. Actualmente la neumática está presente en multitud de aplicaciones en la industria, así como la compresión de aire.

La aparición de electroválvulas proporcionales unida a la continua evolución de la técnica de control nos aleja de la idea de la necesidad de llaves de paso en los circuitos neumáticos o hidráulicos, que hay que abrir o cerrar lentamente hasta conseguir la presión o el caudal necesario, y nos abre un abanico de posibilidades sobre atractivas modalidades de control de estos circuitos. Mediante estas nuevas tecnologías podremos controlar estos parámetros cómodamente, sin lugar a error y evitando problemas, como ocurre en la hidráulica con los golpes de ariete por un cierre repentino de una válvula, mediante la tecnología de los reguladores PID aplicada a la presión.

Utilizando los conocimientos actuales sobre control y con una correcta configuración del funcionamiento, se podría decir que cualquier operario podría controlar un sistema neumático, sin tener conocimiento alguno sobre esta tecnología, desde un panel táctil como si fuese un juego.

Además el control de un sistema neumático tiene una gran similitud al de un sistema hidráulico, lo que hace aún más útil este desarrollo, ya que manteniendo prácticamente el mismo diseño del control y la visualización, se podría controlar un circuito hidráulico de las mismas características.

1.2. Objetivos del proyecto

El propósito de este proyecto es realizar un Sistema de Control y Adquisición de Datos (SCADA), que nos permita controlar en todo momento la presión acumulada en un depósito neumático a través de un sensor, una electroválvula proporcional, un autómatas proporcional, y un PC, de manera que los cambios de presión se realicen de manera rápida y suave en el sistema. Para ello nos ayudaremos de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera sobre la neumática, la regulación y la automatización.

Primeramente se diseñará y ensamblará un circuito neumático con un acumulador neumático como protagonista y los elementos necesarios para los requerimientos de control. Se utilizará una electroválvula proporcional de 5 vías y 3 posiciones que permita pasar una cierta cantidad regulable de aire hacia el acumulador, mantener el aire, o por el contrario dejar escapar, en mayor o menor medida, el aire acumulado en el depósito. Para conocer en todo momento la presión acumulada precisaremos de un transductor de presión-voltaje. Se dispondrá además de un manómetro para conocer de manera analógica la presión alcanzada, éste será muy útil en las primeras etapas de desarrollo del proyecto.

Una vez concluido el montaje neumático se comenzará a desarrollar el control del mismo, dónde se diferenciarán dos partes elementales: 1) la programación del autómatas y 2) el desarrollo del sistema SCADA de control y supervisión del proceso.

Este proyecto se centra principalmente en la parte SCADA con la que el usuario interactuará controlando y supervisando la presión del acumulador neumático. Se configurará un panel de operador intuitivo y sencillo en el que se pueda comandar la presión que se desee tener en el acumulador y se muestre un gráfico de la presión en función del tiempo comparando la presión real que se obtiene con la demandada por el usuario.

En el panel se podrá observar igualmente el comportamiento real que está teniendo en cada momento la válvula proporcional. También se simulará la presión existente en el acumulador de una manera gráfica que consistirá en el llenado en mayor o menor medida de una representación del depósito neumático.

A pesar de que el regulador PID vendrá preconfigurado con unos determinados parámetros de constante proporcional (k_p), tiempo de integración (t_i) y tiempo de derivación (t_d), se aprovechará el proyecto para dotar al sistema de una función didáctica que permita configurar manualmente cada uno de estos parámetros, pudiéndose observar el resultado de la configuración introducida en las respuestas

representadas en el panel y comprender de una manera práctica y sencilla el funcionamiento de este tipo de reguladores.

1.3. Estructura del documento

Este documento técnico constará de siete capítulos en los que se desarrolla el contenido del proyecto final de carrera. A través de los mismo se pretende dar al lector un conocimiento sobre la tecnología utilizada, una descripción de los elementos empleados, la explicación de todos los pasos seguidos para configurar el sistema SCADA, una demostración de los resultados obtenidos al finalizar el trabajo y posibles ampliaciones a realizar en un futuro.

Este primer capítulo es una introducción al trabajo que se va a desarrollar y pretende poner en situación al lector respecto a los objetivos del trabajo.

En el capítulo 2 se estudian los antecedentes sobre la tecnología de la automatización utilizada en el proyecto y cómo se ha llegado a los modernos sistemas con que contamos hoy en día para realizar este tipo de control y supervisión de procesos.

Los elementos físicos utilizados para hacer posible este proyecto se explican en el capítulo 3, donde se describen sus características principales y datos técnicos, su utilidad, su funcionamiento, y qué tipo de conexiones tiene. El capítulo 4 se centra en el desarrollo del sistema SCADA, describiendo sus elementos constitutivos y el software empleado.

Todos y cada uno de los aspectos seguidos para la configuración del sistema SCADA son explicados paso a paso y gráficamente en el capítulo 5, de tal forma que sea comprendido fácilmente y sea posible una nueva configuración por cualquier persona, pese a que carezca de conocimientos sobre el software utilizado.

En el capítulo 6 se exponen los resultados obtenidos una vez concluido el trabajo y se ofrece una breve explicación de cada una de las partes del panel de operador, así como de su funcionamiento genérico.

El capítulo 7 presenta las conclusiones obtenidas al finalizar el presente proyecto, además de una serie de posibles ampliaciones y trabajos futuros a elaborar en este trabajo para mejorarlo y dotarlo de nuevas herramientas.

En los anexos se añaden los planos neumáticos, eléctricos, la programación realizada para el autómatas y las hojas de características de los elementos comerciales utilizados.

2. ANTECEDENTES SOBRE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS SCADA

2.1. Antecedentes generales sobre la automatización.

Hasta bien entrado el siglo XX las únicas herramientas analíticas que poseía el especialista en control eran la utilización de ecuaciones diferenciales ordinarias junto con criterios algebraicos para determinar la posición de las raíces de la ecuación característica asociada. Aplicando el criterio de Routh y Hurwitz el ingeniero determinaba la estabilidad o no de los sistemas, pero para esto se debía obtener el modelo matemático operando mediante ecuaciones diferenciales. Esto suponía un arduo trabajo. Además hay que destacar que el criterio de Routh y Hurwitz no ofrece información de cómo mejorar la estabilidad del sistema.

Desde el punto de vista teórico, la Ingeniería de Control se empieza a consolidar cuando se produce el traslado y aplicación de los conocimientos adquiridos en los problemas de amplificación de señales a los problemas de control industrial.

Estos estudios desembocan en la llamada Teoría Clásica de Control, en la cual se utilizaban como herramientas matemáticas los métodos de Transformación de Laplace y Fourier y la descripción externa de los sistemas.

Dos trabajos de singular importancia son los desarrollados por Minorsky y Hazen. En el trabajo de Minorsky "Directional Stability of Automatic Steered Bodies" [Thaler 74] de 1922, se reconoce la no-linealidad de los sistemas y aplica la linealización mediante el desarrollo en serie de Taylor a sistemas no-lineales correspondientes al movimiento angular de un buque. Estudia la estabilidad y los efectos de los retrasos de la información sobre las salidas de los Sistemas.

Hazen en su publicación "Theory of Servomechanism" (1934) [Thaler 74], analiza el funcionamiento de los servomecanismos utilizando en su análisis entradas típicas de escalón y rampa. Aparte de proponer un marco conceptual, Hazen utiliza

herramientas matemáticas como el cálculo operacional de Heaviside. En sus trabajos estudia el diseño de servomecanismos para posicionar ejes. [1]

2.1.1. El desarrollo de las técnicas frecuenciales.

El estudio de los servomecanismos y los reguladores en el dominio frecuencial se realiza al obtenerse resultados sobre el diseño de amplificadores de señal realimentados. Destacan los trabajos de Nyquist (1932), Black (1934) y Bode (1940).

El suceso que realmente marca época en el desarrollo de los métodos de respuesta en frecuencia es la aparición de trabajo clásico de Nyquist sobre la estabilidad de amplificadores realimentados. Nyquist presenta en este trabajo "Regeneration Theory" [Thaler 74], su célebre criterio de estabilidad. Su investigación surge de los problemas que presentaban la atenuación y distorsión de la señal en la telefonía a grandes distancias.

En 1915 la Bell System había finalizado un enlace telefónico experimental entre New York y San Francisco. Este enlace utilizó una línea aérea de cobre que pesaba 500 Kg/milla y fue cargado inductivamente para tener una frecuencia de corte de 1000 Hz. La atenuación de la señal a lo largo de las 3000 millas era de 60 dB, se redujo a 18dB utilizando seis amplificadores con una ganancia total de 42 dB.

Sin embargo el cambio a operaciones mediante cable, planteó serios problemas técnicos. Debido a la escasa sección de los cables la atenuación era grande y se requerían muchos amplificadores repetidores. Esto suponía que la señal al pasar por múltiples etapas amplificadoras, cada una con sus no-linealidades, se iba distorsionando. Para mantener la inteligibilidad de la señal de audio transmitida en distancias intercontinentales se requería una linealidad efectiva del amplificador muy lejos de la que la tecnología era capaz de dar (una distorsión del orden del 0.005%).

Esta dificultad sólo se pudo vencer con el magnífico invento desarrollado por H. Black de los laboratorios Bell quien propuso la idea de un amplificador realimentado, en su trabajo "Stabilized Feedback Amplifiers" [Thaler 74] en 1934. El descubrimiento importante de Black fue que la elevada ganancia en un dispositivo amplificador no lineal y cuyos parámetros eran variables con el tiempo se podía negociar para conseguir una reducción en la distorsión no lineal de manera que el sistema se comportase como una ganancia lineal, estable y precisa. Black utiliza el criterio de Nyquist y llega a interpretar una serie de fenómenos que se producen en los sistemas realimentados.

El mecanismo era simplemente utilizar componentes pasivos lineales apropiados de gran precisión en el lazo de realimentación de un amplificador no lineal

de elevada ganancia. Hacia 1932 Black y su equipo podían construir amplificadores que funcionaban razonablemente bien. Sin embargo presentaban una tendencia a desestabilizarse. Algunos lo hacían cuando aumentaba la ganancia del lazo del amplificador realimentado, lo cual se podía esperar, pero otros manifestaban estas características cuando la ganancia se disminuía y esto sí que era completamente inesperado.

La situación era muy parecida a la asociada con los reguladores de velocidad del siglo XIX, que presentaban oscilaciones en la velocidad y cuya conducta no se podía explicar con las herramientas de análisis disponibles.

Los amplificadores realimentados de la época podían contener del orden de 50 elementos independientes almacenadores de energía (tales como condensadores, autoinducciones, etc.). Su descripción en términos de un conjunto de ecuaciones diferenciales, como en el análisis clásico de los sistemas de control automático de origen mecánico era casi una tarea imposible a la vista de las rudimentarias facilidades disponibles en esos años para la solución por computador de tales ecuaciones.

El famoso trabajo de Nyquist resolvió este misterio, abrió totalmente nuevas perspectivas en la teoría de los mecanismos realimentados y por lo tanto comenzó una nueva era en el Control Automático. Antes de 1932 el enfoque basado en las ecuaciones diferenciales había sido la gran herramienta del ingeniero del control; en la década que siguió a la contribución de Nyquist estas técnicas fueron casi completamente reemplazadas por métodos basados en la teoría de variable compleja los cuales fueron la consecuencia natural y directa de su nuevo planteamiento.

La solución del problema de la estabilidad de un sistema realimentado propuesta por Nyquist se basaba en la forma de la respuesta en frecuencia de la ganancia en lazo abierto y esto era de un valor práctico inmenso ya que se formulaba en términos de una cantidad (la ganancia) que era directamente medible. Este enlace directo con medidas experimentales era un desarrollo completamente nuevo en trabajos dinámicos de tipo aplicado.

La aplicación del criterio de estabilidad de Nyquist no dependía de la disponibilidad de un modelo del sistema en la forma de una ecuación diferencial. Más aún, daba una indicación inmediata de cómo se podía mejorar la conducta de un sistema realimentado que estaba muy poco amortiguado o que incluso era inestable simplemente modificando de una manera apropiada su característica de ganancia en lazo abierto en función de la frecuencia.

Con la perspectiva de hoy día puede resultarnos demasiado fácil subestimar la magnitud de la invención de Black y el logro teórico de Nyquist, sin embargo las cosas

parecían muy diferentes en su tiempo. La concesión de una patente a Black por su amplificador tardó más de 9 años. La oficina de patentes de EEUU citaba trabajos técnicos que decían que la salida de un amplificador no se podía conectar a la entrada y permanecer estable a menos que la ganancia del lazo fuese menor que uno. La oficina de patentes británica, en palabras de Black, trató la aplicación "como si se tratase de una máquina de movimiento continuo".

El trabajo de Nyquist dejaba sin resolver como estaban relacionadas la amplitud y la fase en función de la frecuencia de la función de transferencia de la ganancia en lazo abierto. En otro de los trabajos clásicos que están en los fundamentos de la Teoría del Control, H. W. Bode realizó este análisis, extendiendo resultados previos de Lee y Wiener.

En el trabajo de Bode "Relations Between Attenuation and phase in Feedback Amplifier Design" [Thaler 74] de 1940, se presenta la definición de margen de fase y margen de ganancia y la definición de los diagramas logarítmicos de Bode.

Bode demostró que dada cualquier función de respuesta en frecuencia $A(\omega)$, siendo A la amplitud de la ganancia en lazo abierto se le puede asociar una función $\Phi(\omega)$, siendo la fase mínima de dicha función de respuesta en frecuencia. De esta forma fue capaz de dar reglas para obtener la forma óptima de la ganancia del lazo en función de la frecuencia para un amplificador realimentado.

En la industria de los procesos químicos la introducción del control por realimentación tendió en un principio a desarrollarse de forma aislada de los desarrollos mecánicos y electrónicos. En estos procesos la evolución de la variable controlada era tan lenta (y lo sigue siendo) que el control se hacía mediante realimentación manual. Los primeros pasos que se dan para controlar estos procesos son la incorporación de instrumentos para supervisar la operación y registradores de plumilla. El desarrollo natural fue utilizar el movimiento de la plumilla del registrador para efectuar una acción de realimentación sobre las válvulas de control en la planta utilizando líneas de transmisión, amplificadores y transductores neumáticos.

Los primeros controladores de temperatura, ofrecían una acción de control de tipo on-off por medio de un simple mecanismo conmutador o relé que pronto se reveló insuficiente para las exigencias planteadas en los procesos industriales, como por ejemplo en la industria láctea, el proceso de pasteurización de la leche. El siguiente desarrollo fueron los primeros reguladores con acción proporcional. En estos reguladores se manifestaba claramente el dilema de la automática: precisión frente estabilidad, si se desea un error estacionario pequeño, se debía aumentar la ganancia del regulador, o lo que es lo mismo disminuir la banda proporcional. Pero esto conllevaba que el proceso era sometido a fuertes oscilaciones en el transitorio. Y si se

aumentaba la banda proporcional, disminuían las oscilaciones pero en caso de cambios en la carga aparecía un error estacionario apreciable. El máximo valor recomendado entonces para la banda proporcional era del cinco por ciento.

Durante los años 30 se desarrollaron completamente estos reguladores neumáticos y se transfirió a este campo del control la idea de utilizar el término de acción integral que se venía empleando desde hacia tiempo en los sistemas mecánicos. El primer regulador de temperatura con acción proporcional integral fue el Foxboro Stabilog patentado por Mason en 1931. En este regulador neumático, se incorporaba amplificación lineal, basada en el principio de la realimentación negativa (al igual que Black en los amplificadores de señal realimentados) y acción integral (reset). Hay que hacer constar que en un principio el Stabilog no tuvo mucho éxito comercial, debido entre otras cosas a su precio y a que no era comprendido su funcionamiento.

A finales de los años 30 se introdujo la acción derivativa en estos controladores neumáticos dando lugar así al regulador PID de 3 términos (Proporcional, Integral y Derivativo).

En 1942 Ziegler y Nichols, ingenieros de Taylor Instruments hicieron un estudio importante que condujo a fórmulas empíricas para sintonizar el regulador PID al proceso. El trabajo "Optimum Settings for Automatic Controllers" [Thaler 74] fue presentado en el "ASME Winter Annual Meeting". Los coeficientes de las distintas acciones proporcional, integral y derivada, se podían determinar de valores medidos experimentalmente del proceso que se deseaba controlar. La importancia de estas reglas de ajuste óptimo de controladores es enorme, siguen siendo vigentes y profusamente usadas en el ámbito del control de procesos industriales.

El trabajo de Ziegler y Nichols es pionero en el desarrollo de la idea de control óptimo, aunque su criterio de optimización, que consiste en minimizar la superficie de error absoluto, no se puede tratar analíticamente.

Un paso crucial en la transferencia de las técnicas utilizadas en el análisis de los amplificadores realimentados de los sistemas de telefonía a otras clases de sistemas fue realizada por H. Harris del MIT en su trabajo "The analysis and design of servomechanisms" [Harris 42], en el cual introduce el uso de funciones de transferencia en el análisis de un sistema realimentado general. Esto permitió que un servomecanismo mecánico o un sistema de control de un proceso químico se representasen mediante diagramas de bloques y utilizasen las técnicas del dominio frecuencial.

2.1.2. Avances durante la Segunda Guerra Mundial.

La Segunda Guerra Mundial supuso un gran impulso al desarrollo teórico y mucho más al desarrollo práctico, dada la fuerte necesidad de sistemas de control que funcionarían como los servos de los radares y el posicionamiento de cañones.

La Segunda Guerra Mundial creó una necesidad urgente para diseñar servomecanismos de altas prestaciones y condujo a grandes avances en la forma de construir sistemas de control realimentados. Las exigencias de la guerra enfocaron la atención sobre un problema importante: el llamado problema de control de tiro, proporcionando una cadena automática de órdenes entre la detección del blanco, el apuntamiento del arma y el disparo. Este problema tiene tres etapas:

- a. Detección y seguimiento del blanco.
- b. Predicción.
- c. Colocación del cañón en posición de disparo.

En el comienzo de la guerra, aunque cada etapa requería algunos operadores, cada uno efectuando operaciones de seguimiento manual, había una considerable controversia en cuanto al valor operacional del control automático. Esto no es sorprendente ya que los predictores que estaban en uso tenían un error medio de 2-3 grados que eran del mismo orden que el error medio de un operador de batería bien entrenado que efectuase un seguimiento manual. Cuando la guerra progresó, aumentó la velocidad de los blancos, el personal entrenado comenzó a escasear y la aparición de los radares de seguimiento mejoró notablemente la capacidad de predicción: era pues el momento para que el control automático se hiciese notar.

Con el objetivo fundamental de investigar y avanzar en los problemas de control del radar y de control de tiro, en marzo de 1942, de una manera informal se constituyó un grupo que posteriormente sería denominado el "Servo-Panel". Su principal función consistió en organizar encuentros, proporcionar información y servir de nexo de comunicación entre diferentes grupos de investigación.

El gobierno americano al intentar desarrollar los sistemas de control automático de tiro se enfrentó con el problema de que aunque había una considerable experiencia en temas de control, ésta se encontraba dispersa entre muchas ramas de la ingeniería y faltaba el atributo unificador de una terminología en común. La reacción no se hizo esperar, con la formación en 1940 bajo la dirección del Dr. Vannevar Bush del Comité de Investigación de Defensa Nacional (NDRC).

Entre los muchos comités del NDRC estaba el de Control de Tiro que bajo el liderazgo de Warren Weaver coordinó el trabajo de los servicios, laboratorios industriales y universidades. El comité era responsable de la dirección de la investigación y de la circulación de informes reservados a los grupos apropiados.

Los informes de Brown, Harris, Hall, Wiener, Phillips y Weis entre otros, fueron emitidos bajo los auspicios del NDRC y su contenido no fue conocido hasta finales de los años 40.

2.1.3. Albores de la era espacial.

Desde siempre los procesos más complejos comandados por computador han sido las aplicaciones de control de vuelo aeroespaciales. Sin disponer de las tecnologías del control automático y los computadores, hubiera sido imposible que el hombre hubiera viajado al espacio. Los pioneros en esta aplicación fueron, además de otros, el ruso Constantin E. Tsiolkovsky (1857-1935), y el alemán Hermann Ganswindt (1856-1934) que criticaron a los astrónomos y matemáticos de la época que aseguraban que nunca jamás el ser humano poseería los medios para conseguir el control, la precisión y la velocidad necesaria para los vuelos en el espacio.

Uno de los primeros trabajos en este campo se debe al alemán Hermann Oberth, que en su artículo "Die Rakete zu den Planetenräumen" (Cohetes en el espacio interplanetario) publicado en 1923, afirma que para poder efectuar vuelos en el espacio, el hombre debe acceder a técnicas de control automático mucho más sofisticadas que las disponibles entonces. En su trabajo de 1929 "Wege zur Raumschiffahrt" (Métodos para volar en el espacio) predice que el desarrollo de cohetes que dispongan de la suficiente fuerza propulsiva llevará largo tiempo y lo mismo sucederá con la necesaria tecnología de control automático. Asimismo un elemento fundamental en la navegación espacial será la precisión a la hora de maniobrar dado que las velocidades y las distancias implicadas son enormes (evidentemente astronómicas). Para colocar un satélite orbitando sobre la tierra es necesaria una velocidad mínima de 7,904 kilómetros por segundo. Para poder escapar de la tierra y navegar por el espacio interestelar es necesaria una velocidad mínima de 11,178 Km/s. conocida como la velocidad de escape. Estas velocidades resultaban difíciles de imaginar para la época cuando un coche que circulaba a 100 Km/h necesitaba cinco minutos para recorrer la distancia de ocho kilómetros. En otras palabras el cohete debía ir a una velocidad trescientas veces superior a la del coche.

La falta de oxígeno en el espacio exterior conllevaba la imposibilidad de realizar la combustión en las turbinas de los cohetes. Robert H. Goddard publica en 1919 el primer trabajo "A Method of Reaching Extreme Altitudes" donde se describen cohetes cuya combustión se basaba en oxígeno líquido.

Las mayores contribuciones al campo de la navegación espacial que posibilitaron que el hombre llegara a la luna en 1969 se realizaron en la base alemana de Peenemünde situada en la isla de Usedom del mar Báltico. La base fue construida entre 1936 y 1940. Las investigaciones y desarrollos realizados ahí constituyen uno de los capítulos más excitantes de la historia de la ciencia y la técnica.

Las primeras unidades desarrolladas para el ejército alemán, las denominadas A1 y A2, fueron destinadas principalmente al ensayo de sistemas de propulsión y control de cohetes. Una vez se dispuso de unidades en funcionamiento, enseguida se observó que el principal problema a solucionar era mantener el sistema estable. Según palabras de Willy Ley [Willy 44] los conocimientos que se poseían entonces sobre la estabilidad de los cohetes "se podían escribir en una postal, dejando alguna parte en blanco".

Para el desarrollo del tercer ingenio, la A3, la marina Alemana envió a un reconocido especialista en el problema de estabilización y alineamiento de las torretas de tiro, el clásico problema del control de la segunda guerra mundial. Sin embargo este ingenio no se terminó de construir dado que el mecanismo de control se reveló inadecuado. Después de lo cual se desarrolla un nuevo sistema de control bastante avanzado para la época. Este sistema utilizaba giróscopos y acelerómetros como elementos sensores y disponía de servomotores eléctricos que podían efectuar pequeños y precisos movimientos, contruidos en molibdeno, un material resistente a altas temperaturas, y encargados de controlar el suministro de gas a las turbinas del cohete.

Para estudiar la dinámica del sistema se construyó un simulador mecánico, cuyo diseño se basó en los registros obtenidos de los vuelos de los primeros ensayos mediante radiotelemetría (otro desarrollo pionero). En este momento, Willy Ley hubiera necesitado al menos doce docenas de postales.

Esta concentración de esfuerzos en resolver los problemas de control y estabilidad condujo al desarrollo de la unidad A4, que Goebbels después denominaría V2–V de Vergeltungswaffe (misil de justo castigo o pena merecida). Ya en las primeras pruebas efectuadas por este misil se le equipó con un potente equipo de radio con el objetivo de realizar medidas mediante telemetría y también disponía de un sistema de radiocontrol en fase de pruebas. En 1943 un misil A4 se estrelló en la zona de Borholm en Dinamarca, siendo recuperados sus restos por agentes de aquel país que se encargaron de enviar fotografías y dibujos a Inglaterra vía Estocolmo. En el verano de 1944 otro misil se estrelló al sur de Suecia, este fue entregado a los aliados, los cuales se alarmaron ante lo que se veía venir. Los aliados concluyeron erróneamente que estos ingenios estaban guiados por radio. Nada más lejos de la realidad, las pruebas realizadas por los investigadores alemanes afirmaban que les era imposible controlar

los misiles con la debida precisión. Los ingenios eran alineados hacia su objetivo (primero fue París y después Londres), pero una vez habían sido lanzados era imposible modificar la trayectoria del misil.

Durante las últimas fases de la segunda guerra mundial en la base de Peenemünde se llegaron a realizar proyectos sobre misiles transatlánticos (la unidad A6)...Incluso la Gestapo llegó a arrestar a Wernher Von Braun por haber hablado abiertamente de la posibilidad de enviar objetos al espacio.

Fue liberado gracias a la mediación del director de la base de Peenemünde, que explicó a altos oficiales de la Gestapo que las ideas de von Braun contribuían a la creación de nuevos y más potentes misiles de justo castigo. Cuando Alemania está ya prácticamente derrotada, en mayo de 1945, la base de Peenemünde junto con todo su arsenal de cohetes cayó en manos de los aliados, y en Julio de ese mismo año trescientos vagones de tren cargados de cohetes A4 llegaron a una base de Nuevo México. También se trasladó allí todo el equipo científico alemán que continuó con su labor de investigación.

2.1.4. Los años clásicos: 1945-1955

Desde el punto de vista del desarrollo de las técnicas de diseño de control automático, el principal resultado de este gran esfuerzo y experiencia fue extender rápidamente la utilización de las ideas de respuesta en frecuencia a todos los campos y producir así una teoría unificada y coherente para los sistemas realimentados con un único lazo.

Coincidiendo con la segunda guerra mundial, el matemático Wiener desarrolla la teoría estocástica clásica, la cual tuvo su inicio en el estudio del problema de automatización de un cañón aéreo. En este trabajo se da un enfoque radicalmente distinto del estudio del problema del control, y supone el inicio de la conocida como "teoría estocástica clásica". Las aportaciones de Wiener consisten en considerar la presencia de ruidos en las señales, e introduce también el concepto de control óptimo, cuyo objetivo consiste en minimizar un determinado criterio que define la calidad del control, en este caso minimiza la superficie de error cuadrático [Wiener 49].

Wiener también establece la relación entre estos ingenios autogobernados y determinados procesos que suceden en los seres vivos. Todo ello, conduce a la formulación de lo que se denominaría cibernética en su trabajo "Cybernetics" de 1948 publicado por el MIT press [Wiener 48].

A finales de la década de los cuarenta, surgen otras dos vías de desarrollo de la teoría de control: el método del modelo de Truxal [Truxal 54] y el método del lugar de

las Raíces, de Evans. Se presentan también aportaciones como la extensión de los métodos frecuenciales a sistemas no-lineales y a sistemas estocásticos.

El método del modelo es una adaptación del método de Guillemín desarrollado inicialmente para el diseño de redes pasivas. Partiendo de las especificaciones deseadas se obtiene la función de transferencia que debe seguir el sistema de control. El cálculo de la función de transferencia del regulador se realiza fácilmente por medio de operaciones algebraicas. Este método resultaba atractivo dado que no utiliza la técnica de prueba y error. Pero se manifestaban en él algunas dificultades prácticas como podían ser la complejidad de los correctores que se obtienen, que dejaban de tener la estructura clásica PID.

Los trabajos de Evans recogidos en [Thaler 74] constituyen la última gran contribución a la

Teoría clásica de control. En palabras del propio autor "el lugar de las raíces determina todas las raíces de la ecuación diferencial de un sistema de control por medio de una representación gráfica, la cual permite una síntesis rápida de la respuesta transitoria o frecuencial deseada".

El método de Evans cuenta con la desventaja de no poder abordar el análisis de sistemas con retraso puro y la difícil estimación de la respuesta temporal de sistemas con distribuciones dispersas de polos y ceros. A su favor, aporta un método gráfico de estimar la influencia de variaciones en los parámetros del sistema o del regulador sobre la estabilidad y el comportamiento dinámico de los sistemas.

2.1.5. Primeros pasos del control por computador

Como la rotación de un radar de seguimiento solamente ilumina a su blanco de forma intermitente, muchos de los sistemas de control de tiro desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial tuvieron que diseñarse para tratar con datos que estaban disponibles de forma pulsada o muestreada.

Los computadores desarrollando funciones de control de procesos son elementos que trabajan por ciclos. No trabajan en tiempo continuo sino en tiempo discreto. El computador necesita un tiempo para adquirir las entradas (mando y realimentaciones), calcular las acciones, y para volcar las acciones sobre el sistema, que consiste en un proceso de conversión digital-analógico. Este ciclo se ejecuta cada cierto intervalo de tiempo o período de muestreo por lo que los computadores trabajan en tiempo discreto. Por lo tanto la teoría de los sistemas continuos desarrollada hasta entonces era inservible.

Las bases para un tratamiento efectivo de los sistemas muestreados fueron establecidas por Hurewicz, quien desarrolló una extensión apropiada del criterio de estabilidad de Nyquist para este tipo de sistemas. El posterior desarrollo de las técnicas de cálculo digital iba pronto a conducir a un campo de investigación muy activo sobre tales sistemas discretos. Shannon en 1948 estudia los procesos de muestreo y reconstrucción de señales con presencia de ruido [Shannon 48].

Los sistemas de control digital que operan sobre plantas de naturaleza continua, requieren técnicas de análisis que permitan que ambas clases de sistemas, continuos y discretos, así como sus interconexiones a través de interfaces adecuadas se puedan ver desde un punto de vista unificado. Este trabajo lo desarrolló Linvill en el dominio transformado.

La teoría de sistemas muestreados es llevada a cabo, entre otros, por Balcer, Ragazzini, Zadeh y Salzer. El impulso definitivo para el estudio de esta clase de sistemas se debe al grupo del profesor Ragazzini en la Universidad de Columbia en la década de los 50. Entre sus integrantes figuraban investigadores de la talla de Zadeh, Kalman, Jury, Franklin, Bertram, Bergen, Friedland, Slansky y Kranck entre otros.

Salzer en 1954 introduce la transformada Z, la cual permite que los resultados obtenidos en el estudio de los sistemas continuos se puedan aplicar a los sistemas discretizados en el tiempo. Esto hace que se desarrollen los estudios que pretenden trasladar al campo discreto los resultados obtenidos para el campo continuo.

A finales de la década de los cincuenta, los trabajos de Jury en 1958, "Sampled data control Systems" con su criterio de estabilidad, los de Ragazzini y Franklin también en 1958 con idéntico título al de Jury, y el trabajo de Tou de 1959 "Digital and Sampled Data Control Systems" terminan por definir y establecer la teoría clásica de los sistemas muestreados.

2.1.6. Teoría moderna de control.

A partir del año 1955, se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de las computadoras digitales, que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo.

Aparece un nuevo método de diseño de control, conocido a partir de entonces como "Teoría de control moderna". Se basaba en representar los sistemas en variables de estado o representación interna y trabajando casi exclusivamente en el dominio del tiempo.

La primera formulación en términos de estado, función de transición y de lectura, se hizo en el marco de la teoría de máquinas discretas formulada por Turing, en 1936.

Los investigadores de la Unión Soviética son los primeros que utilizan el método de descripción interna en el estudio de los sistemas continuos. Destacan los trabajos de Aizerman, Lerner, Lurie, Pontryagin, La Salle, Popov, Minorsky, Kabala y Bellman.

La teoría de control moderna está basada en el concepto de estabilidad de Liapunov presentado a finales del siglo XIX. Los trabajos desarrollados por Lurie sobre servomecanismos de posicionamiento de torretas de tanques dieron lugar al concepto de estabilidad absoluta, generalizada después por Popov con el concepto de hiperestabilidad, que considera no linealidades en la realimentación.

Los criterios de controlabilidad y observabilidad de sistemas dinámicos lineales, se deben a Kalman, aunque la noción de controlabilidad fue utilizada anteriormente por Pontryagin.

Los métodos de control óptimo se basan en los trabajos de físicos de los siglos XVII al XIX, entre los que destaca Euler, con su cálculo de variaciones. En el desarrollo de estos métodos se deben destacar los trabajos de Pontryagin, La Salle, Bellman y Kalman.

Kalman efectúa la resolución de los problemas de control óptimo cuadrático y lineal cuadrático gaussiano.

Zadeh generaliza los resultados de teoría de circuitos a sistemas en el espacio de estados y Luenberger en 1966 lo hace en lo que concierne al diseño de observadores.

En el control algebraico, basado en la utilización de matrices polinomiales y racionales, hay que hacer mención de los trabajos de Kalman, Rosebrock y Wolowich. Son métodos que utilizan la descripción externa. Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se presenta el enfoque geométrico del problema de control, que utiliza métodos del álgebra lineal. En paralelo se desarrollan los métodos de identificación de sistemas, por mínimos cuadrados y de máxima verosimilitud, este último fue desarrollado por Fisher en 1912 y aplicado en sistemas industriales por Åström y Bohlin en 1965.

También se desarrollan las técnicas de “control adaptativo”. Desde un punto de vista conceptual, las técnicas adaptativas aparecen cuando se transvasan a la máquina comportamientos inherentes al hombre: La adaptación, no en términos de decisiones

(conseguida con la realimentación simple), sino en término de estructuras para la decisión.

Los tipos de estructuras de control adaptativas que han tenido mayor impacto técnico son las siguientes:

- Sistemas Auto-Ajustables.
- Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia (S.A.M.R.).

El concepto de regulador autoajustable fue propuesto inicialmente por Kalman, utilizando un método de identificación de mínimos cuadrados recursivos en su artículo "Design of a self-optimizing control system" [Kalman 58], otro sistema, basado en la minimización de la varianza de salida es desarrollado por Peterka en 1970, y por Åström y Witenmark en [Åström 73]. Se consideraba el problema en un entorno estocástico.

La técnica de los sistemas autoajustables se basa en que si se dispone de un método válido de diseño de reguladores que parte del conocimiento del modelo del proceso, para realizar un control que se adapte a los cambios en el proceso basta con acoplar ese método de diseño de reguladores con un procedimiento de identificación en línea. Para ello se supone, evidentemente, que existe una separación entre las tareas de identificación y control. Se dispondrá de un "calculador" que en paralelo al control se encarga de calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador. Este "calculador" consiste en un estimador recursivo de los parámetros del sistema o proceso controlado. Los resultados del estimador servirán para calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador.

El principal inconveniente de esta aproximación es que la estabilidad no llega a asegurarse en el caso general.

Los sistemas adaptativos con modelo de referencia (SAMR) fueron propuestos por los investigadores del M.I.T. Whitaker, Narmon y Kezer en 1958 al estudiar los servomecanismos con ganancia variable en la publicación "Desing of a Model Reference Adaptive System for Aírcraft" [Whitaker 58].

Los Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia se basan en otro concepto muy simple: se desea que el comportamiento del proceso sea "idéntico" al de un modelo que se da como referencia. Si existe diferencia entre las salidas del proceso y del modelo un mecanismo de adaptación intenta minimizarla con el ajuste de los parámetros del regulador, o añadiendo una variación en la acción sobre el sistema físico.

Esta aproximación alcanzó un primer paso hacia su madurez teórica con el trabajo de Parks "Model Reference adaptative methods. Redesign using Liapunov's second method" [Parks 76]. De esta forma se pudo garantizar la estabilidad global del sistema adaptativo. Posteriormente, Landau en su trabajo. "Adaptative Control. The model reference aproach" [Landau 79] utiliza la teoría de la hiperestabilidad de Popov en el diseño de SAMR.

A pesar de las diferencias aparentes entre las dos aproximaciones, SAMR y SAA, se han publicado últimamente gran cantidad de trabajos orientados a mostrar sus semejanzas. Quizás se pueda comenzar a hablar de una teoría unificada de los sistemas adaptativos.

En principio se llegó a pensar que la teoría de control moderna conduciría a un método de diseño de sistemas de control bien definido, sencillo y que pudiera ser mecanizado.

Pero se tuvo que admitir que la bondad del diseño dependía de la bondad del modelo y de las especificaciones que se emplean para desarrollarlos.

Se han llegado a desarrollar métodos mecanizados de diseño en el dominio de la frecuencia que son equivalentes a los métodos de diseño de variable de estado cuando la estructura del control es coincidente.

2.2. Antecedentes generales sobre sistemas SCADA.

Cualquier sistema de automatización industrial pretende controlar la actividad y el progreso de un proceso sin la necesidad de la presencia e intervención continuada de un operario.

Un elemento fundamental en los sistemas SCADA es el HMI, que es la parte con la que interactúa el operario, es con este elemento el que le es visible y con quién mantiene el contacto directo y no la PLC, los cableados, sensores... que están en un segundo plano para su percepción y podríamos decir que son lo que está detrás. Se podría explicar de otra forma asemejando el SCADA a una empresa, dónde el HMI sería el front-office (parte de la empresa que está en contacto con el cliente), y el resto de elementos serían el back-office (parte dedicada a gestionar la propia empresa, los servicios que presta y con la cual el cliente no necesita contacto).

Los tradicionales sistemas HMI (Human Machine Interfaz), destinados a la supervisión y el control de los procesos, con paneles de control como el de la Figura 2.1, atiborrados de potenciómetros, pulsadores, interruptores, instrumentación analógica y lámparas señalizadoras de avisos y con complicados cableados, suponían grandes costes y dificultades en instalación, mantenimiento y actualización. Pero la aparición de los modernos HMI ha supuesto una renovación de estos dispositivos y su sustitución por los actuales elementos digitales, que aprovechan al máximo la informática industrial, y reemplazan todos esos elementos del panel de control por un sencillo panel en una pantalla de ordenador como el de la Figura 2.2.



Figura 2.1: Panel de control clásico.



Figura 2.2: Panel de control moderno

Mediante una configuración adecuada del panel de operador, el usuario podrá interactuar de forma sencilla y dinámica con el proceso. En la pantalla se mostrará la

información necesaria que el usuario necesite conocer en cada momento y se le permitirá mantener comunicación con los controladores. Cualquier variación significativa del proceso en su evolución a lo largo del tiempo quedará registrada y podrá ser observada por el usuario.

En los sistemas clásicos, el control es realizado por controladores autónomos o por autómatas programables, el ordenador, conectado con estos dispositivos, hace las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de información del proceso y control de producción. Según esta estructura, el ordenador no actúa directamente sobre la planta, sino que queda limitada a funciones de información y supervisión, dando lugar a las actuales salas de control como la de la Figura 2.3, tan frecuentes hoy en día en la industria.



Figura 2.3: Sala de control de planta.

Pero en los últimos años esto ha quedado atrás y el control por ordenador de los procesos (lectura de sensores, activación/desactivación de actuadores) ha pasado a implantarse y prácticamente indispensable en cualquier proceso automatizado. Para poder realizar estas funciones es necesario un hardware adicional actualmente presente en cualquier PLC comercial.

Los ordenadores se comunican con el PLC mediante conexiones digitales (buses de campo, redes locales), y envían órdenes o comandos que el autómata reenvía al dispositivo correspondiente mediante señales digitales o analógicas.

El software necesario para este control desde el ordenador y el hardware adicional que se necesita, se denominan en su conjunto sistema SCADA, que es el

acrónimo de la expresión en lengua inglesa “Supervisory Control And Data Acquisition”, “Supervisión de control y adquisición de datos” en su traducción al castellano.

Estos programas de software ofrecen las siguientes prestaciones:

- Elaboración de informes, avisos y estados.
- Representación de gráficos con la evolución de procesos, así como generación de históricos de las señales.
- Ejecución de comandos que prevalecen sobre el control normal del proceso programado en el autómatas.
- Programación numérica que soporte cálculos aritméticos sobre la CPU del ordenador y no sobre el autómatas.
- Capacidad de crear paneles de alarma, con registro de las incidencias producidas, y que exijan la presencia del usuario para supervisarla, o incluso una parada automática del proceso. [2]

Estas prestaciones conjuntamente con aplicaciones propias del PC, nos permiten realizar tareas tales como presentaciones en pantalla, control de actuadores, grabación de datos en disco o su impresión, análisis de señales, etc.

Los paquetes de software SCADA más comunes normalmente consisten en dos aplicaciones: editor y ejecutor. En el editor se desarrolla el programa que va a ser visible por el operador, utilizando las diferentes herramientas que nos ofrecerá el software (bloques, gráficos, botones...). Mientras que la función del ejecutor es compilar el programa creado dando lugar a un fichero EXE que se ejecutará al arrancar el PC.

Por tanto, con todo lo explicado anteriormente, podemos definir a un SCADA como la aplicación software fundamentalmente diseñada para ejecutarse específicamente en ordenadores industriales, con acceso a los elementos a controlar a través de un autómatas mediante comunicación digital, e interactúa con el operador mediante una interfaz gráfica de alto nivel: pantallas táctiles, ratones o cursores, etc.

Siguiendo con la filosofía de los modernos sistemas de automatización un sistema SCADA debe cumplir las siguientes expectativas:

- Aplicaciones que no necesitan un equipo muy potente, con un interfaz limpio y atractivo para el usuario.
- Fácil comunicación con el proceso, aunque esté situado a gran distancia y con otros ordenadores a través de redes locales.

- Programas con arquitecturas abiertas, que permitan una fácil modificación adaptándose a nuevas necesidades en la producción.

El tipo de ordenadores utilizados como soporte hardware para aplicaciones SCADA es muy variado y depende de las necesidades de cada sistema. Son utilizados miniordenadores PC, ordenadores convencionales, ordenadores industriales e incluso ordenadores ruggedizados más robustos y con protección para soportar fuertes golpes y especial para ciertos ambientes industriales.

Pese a que es posible emplear arquitecturas basadas en ordenadores PC con sistemas operativos Windows y paquetes de software con funcionalidades para mejorar sus prestaciones, es habitual el uso de ordenadores con sistemas operativos más completos (Unix, Windows NT) y arquitecturas cliente-servidor que comparten recursos informáticos que permiten la ejecución de programas que atienden varios servicios a la vez.

Este tipo de arquitecturas cliente-servidor se hacen indispensables en la utilización de aplicaciones muy grandes para distribuir datos procesados entre diferentes ordenadores y de esta forma reducir la carga de procesamiento de datos de cada PC.

Además de todo lo comentado anteriormente, es importante en un sistema de este tipo, tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Número de variables que es capaz de manipular, temporizadores, contadores, cantidad de elementos de representación de gráficos que soporta.
- Comunicación con elementos de campo (habitualmente mediante puerto serie RS-232 o RS-485)
- Capacidad de intercambio de datos con otros programas o entornos como bases de datos, etc.

Para la realización de este proyecto se ha recurrido al paquete de software de la casa Siemens WinCC Flexible.

Simatic WinCC constituye el entorno de desarrollo abierto de Siemens en el marco de los SCADAS para la visualización y control de procesos industriales. Sus características más importantes se pueden resumir en:

- Arquitectura de desarrollo abierta (permite programación en C).
- Soporte de tecnologías ActiveX.

- Comunicación con otras aplicaciones vía OPC.
- Comunicación sencilla mediante drivers (código que implementa el protocolo de comunicaciones con un determinado equipo inteligente) implementados.
- Permite programación online.

Es fácil de manejar y configurar, y puede integrarse en cualquier sistema de automatización existente, permitiendo reducir sus costes de configuración y software.[3]

3. MONTAJE DEL SISTEMA

3.1. Introducción

El sistema tiene dos partes claramente diferenciadas, que serían el panel neumático (formado por filtro-regulador, distribuidor, manómetros, válvula proporcional 5/3, acumulador de aire comprimido y sensor analógico de presión), y un sistema de control, supervisión y adquisición de datos en modo HMI (Human Machine Interface) compuesto por una PLC que será la encargada de controlar el sistema y un software SCADA mediante el cual el usuario podrá supervisar a través de una CPU el estado de la presión y configurar los diferentes parámetros de control del sistema.

3.2. Sistema neumático

El sistema neumático va ensamblado tal y como se muestra en la Figura 3.1 sobre una plataforma ranurada de aluminio mediante unos adaptadores que permite un fácil acoplamiento.

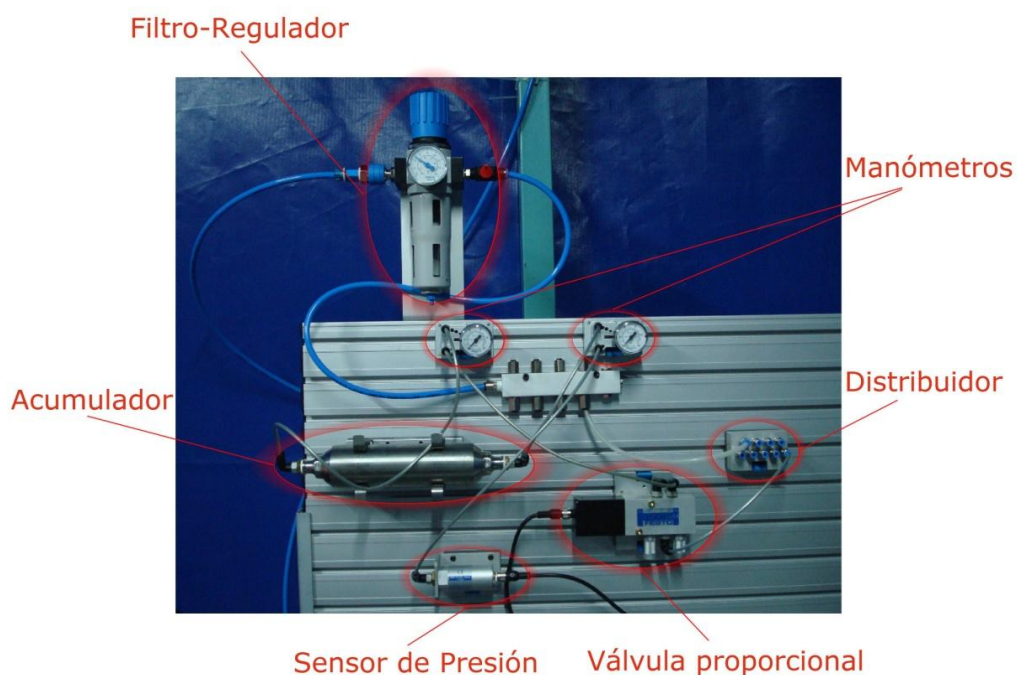


Figura 3.1: Montaje neumático.

Las interconexiones entre los dispositivos del montaje se pueden observar en el esquema de la Figura 3.2, dónde se puede apreciar que el depósito está controlado por una válvula de control proporcional, la cuál será la encargada de permitir el paso de aire al acumulador, o por el contrario de circularlo al escape. Los dos manómetros nos muestran visualmente la presión del depósito y el sensor envía en forma de señal eléctrica la presión que el aire ejerce sobre el acumulador neumático.

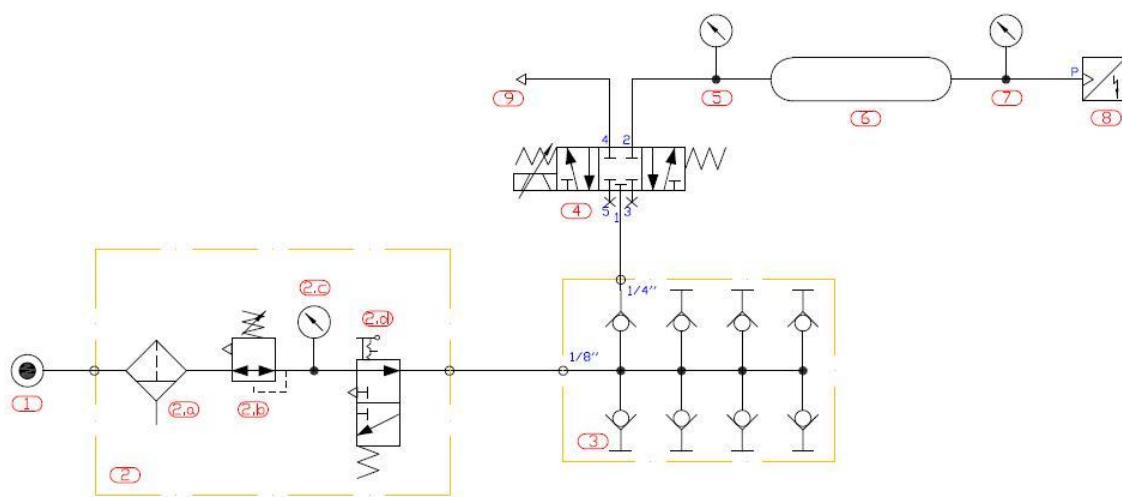


Figura 3.2: Esquema neumático.

A continuación se explicará cada elemento neumático, sus conexiones y sus principales características.

3.2.1. Filtro-regulador

Este elemento consiste en una unidad de filtración neumática y regulación de la presión, además dispone de una válvula de interrupción. En la Figura 3.3 se muestra el aspecto físico del elemento.



Figura 3.3: Aspecto físico del filtro-regulador. [4]

El sistema de filtrado (Figura 3.4) permite que el aire comprimido que entra al circuito no contenga partículas que puedan provocar un mal funcionamiento del equipo, limpiando cualquier tipo de suciedad, impureza, oxidación o condensación que pueda ser arrastrado desde el sistema de alimentación neumático. El regulador de presión (Figura 3.4) ajusta el aire comprimido a la presión de funcionamiento del sistema y compensa cualquier fluctuación que se pudiese producir manteniendo una presión constante en todo momento. El cartucho de filtrado se puede drenar mediante un tornillo. El manómetro (Figura 3.4) muestra la presión preestablecida. La válvula de 3/2 (Figura 3.4) se acciona a través del mando azul deslizante. Este elemento queda representado en su conjunto por el esquema de la Figura 3.4.

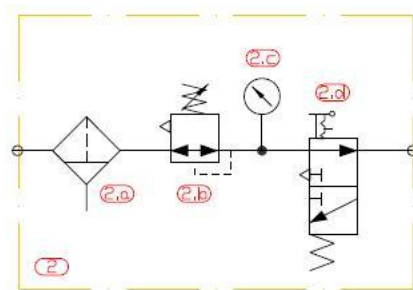


Figura 3.4: Esquema del filtro-regulador.

3.2.2. Distribuidor

Como se puede ver en la Figura 3.2, el distribuidor (ref. 3) simplemente tiene la misión de adaptar la conexión QS-6 que proviene del filtro-regulador (ref. 2) a la conexión QS-4 con la que se interconectan el resto de elementos del sistema, ya que para este circuito solo se necesita una línea de presión. Cada salida del distribuidor está protegida con un antirretorno. En la Figura 3.5 se muestra una imagen del distribuidor.



Figura 3.5: Aspecto físico del distribuidor.

Tal y como se muestra en el símbolo hidráulico del elemento de la Figura 3.6, cada salida del distribuidor está protegida con un antirretorno, como elemento de seguridad, que evita que cualquier flujo de aire vuelva al circuito distribuidor.

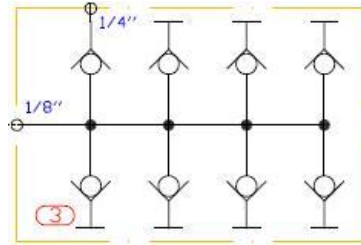


Figura 3.6: Esquema del Distribuidor

Los tubos del sistema neumático serán en general PUN 4 x 0.75 con un diámetro exterior de 4 mm, interior de 2,6 mm con un espesor de 0,75 mm, exceptuando el que conecta el filtro-regulador con el distribuidor que será PUN 6 x 1 de 6 mm de diámetro exterior e interior de 4 mm con un espesor de 1 mm.

3.2.3. Válvula proporcional 5 vías, 3 posiciones

La servoválvula proporcional de 3 posiciones y 5 vías de accionamiento directo nos permite controlar el paso de una determinada cantidad de flujo de aire en una determinada dirección.

El aspecto físico de la válvula proporcional del sistema es el mismo que el que se muestra en la Figura 3.7 a diferencia de que la válvula utilizada cuenta con racores rápidos de la serie QS en los terminales 1,2 y 4 para conexiones neumáticas G 1/8.



Figura 3.7: Aspecto físico de la válvula proporcional 5/3.

A través de una corredera regulada se obtienen tres posiciones distintas, la posición neutra o cerrada, la posición de llenado y la posición de

vaciado o escape. La válvula también es capaz de modificar las secciones de las salidas para permitir el paso de una menor o mayor cantidad de aire. Las diferentes posiciones y secciones, y por tanto el control del flujo de aire tal y como se muestra en la Figura 3.8, se realiza electrónicamente mediante un transductor electromecánico a través de una señal de tensión de 0 a 10 V, correspondiendo a 5 V la posición neutra de cerrado, y a 0 y 10 V los valores máximos de escape o llenado respectivamente.

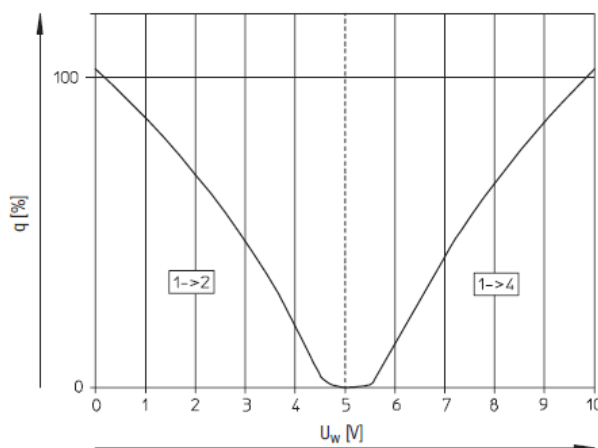


Figura 3.8: Caudal en función de la tensión.

La válvula tiene una tensión de alimentación de 24 Vcc, una presión máxima de funcionamiento de 10 bar, una histéresis máxima de 0,4 % y un tiempo de conmutación de 5 ms. En caso de pérdida de la señal de control o sobrecalentamiento, la válvula quedará automáticamente en posición central de cerrado.

Las conexiones eléctricas que permiten la alimentación y el pilotaje de la válvula se realizan mediante un cable de la serie KMPYE de Festo. El extremo conectado a la válvula es el mostrado en la Figura 3.9, el otro extremo cuenta con cuatro clavijas de conexión segura de diferentes colores que irán conectadas a la fuente de alimentación y a los pines analógicos de la PLC. Estas conexiones se muestran en la Tabla 3.1.

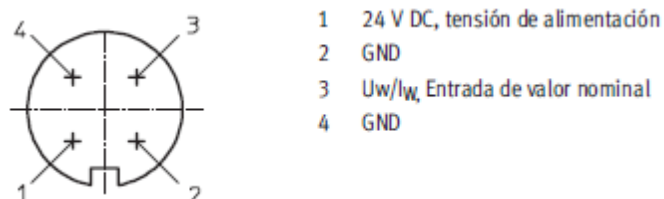


Figura 3.9: Conexiones eléctricas de la válvula.

Conexión	Terminal
Alimentación +24 V	Rojo
Alimentación 0 V	Azul
Señal de control (0 a 10 V)	Negro
GND control	Blanco

Tabla 3.1: Conexiones de la válvula proporcional 5/3.

En la Figura 3.10 se muestra el esquema neumático de la servoválvula proporcional con pilotaje electrónico proporcional y retorno por muelle, dónde se pueden apreciar las 3 posiciones y las 5 vías, así como el pilotaje proporcional eléctrico con retorno por muelle.

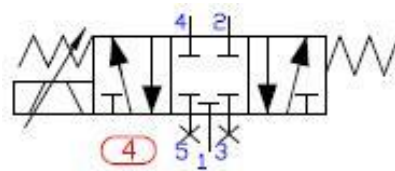


Figura 3.10: Esquema válvula proporcional 5/3.

3.2.4. Manómetros

El sistema cuenta con dos manómetros a ambos lados del acumulador. Su aspecto físico es el que se muestra en la Figura 3.11. Su función, básicamente, es la de contrastar la información que se obtiene en tiempo real en el panel de operador del PC a partir de los datos transmitidos a la PLC desde el sensor de presión, y comprobar que estos son verídicos.



Figura 3.11: Aspecto físico del manómetro.

El manómetro puede medir presiones que estén en el rango de los 0 a 10 bar, pero no se recomienda superar para una presión continua el 75 % del valor máximo de escala. Su símbolo neumático es el mostrado en la Figura 3.12.



Figura 3.12: Esquema del manómetro.

3.2.5. Acumulador neumático

El acumulador o depósito neumático mostrado en la Figura 3.13, es el dispositivo del sistema encargado de almacenar el aire. Este dispositivo de acero inoxidable puede acumular hasta 400 mililitros de aire y es capaz de soportar un rango de presión de -0,95 a 16bar.



Figura 3.13: Aspecto físico del acumulador neumático.

Generalmente estos acumuladores se utilizan con el fin de compensar oscilaciones de presión o como depósitos a los que recurrir para cubrir picos de consumo de aire, pero la función en este sistema es la de almacenar aire regular su presión. En la Figura 3.14 se representa su simbología neumática.

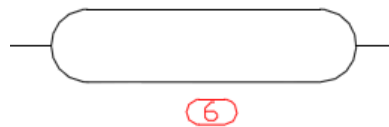


Figura 3.14: Esquema del acumulador.

3.2.6. Sensor analógico de presión

El elemento mostrado en la Figura 3.15 está compuesto por el sensor de presión y un amplificador integrado. Va encapsulado con una carcasa de aluminio que lo aísla de la temperatura exterior. El flujo de aire que proviene

de la salida del depósito, entra por una conexión neumática rápida de G $\frac{1}{4}$, ejerce presión sobre el sensor a través de una capa de silicona que protege al elemento piezorresistivo.



Figura 3.15: Aspecto físico del sensor de presión.

Se trata de un sensor que funciona bajo el principio físico del efecto piezorresistivo (el mismo principio que rige a las galgas extensiométricas), este efecto se basa en un cambio de la resistencia cuando el material se ve sometido a un esfuerzo mecánico que lo deforma, en este caso compresión. El cambio de la resistividad se debe a la variación de la distancia interatómica del metal. Este tipo de sensores pueden verse afectados por la temperatura, por lo que hay que tener en cuenta el ambiente de trabajo donde se van a utilizar, en este caso no hay ningún problema ya que el sistema va a trabajar en todo momento a una temperatura ambiente dentro del rango aconsejado (0 a 85 °C).

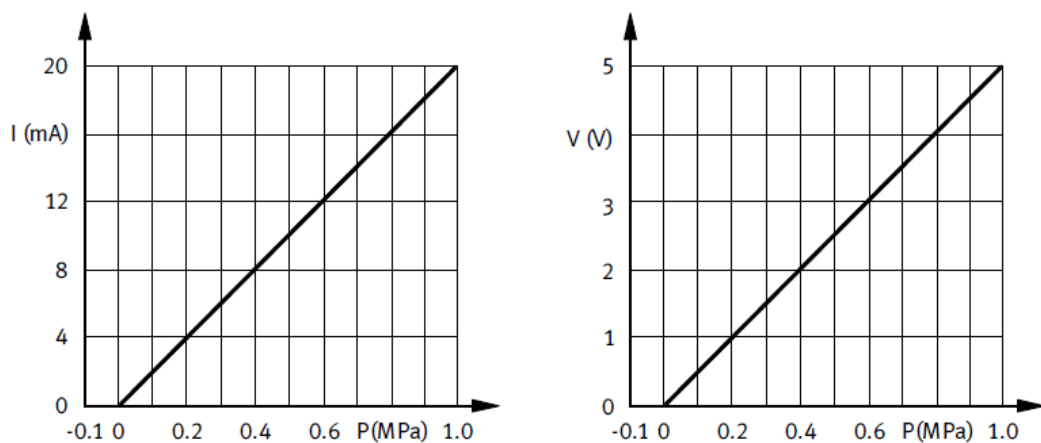


Figura 3.16: Corriente y tensión de salida en función de la presión.

La compresión producida sobre el sensor piezorresistivo provoca un cambio en la señal analógica que es incrementada por el amplificador obteniéndose una tensión o una corriente en función de esta presión, tal como

se puede observar en la Figura 3.16, que va desde los 0 a los 10 bar (0 a 1 MPa). El sensor también es capaz de registrar presiones negativas, pero el fabricante no garantiza la linealidad para estos casos. La conexión eléctrica a través de la que se suministra corriente al sensor y por la cual se transmite la tensión y corriente de salida se hace a través de un terminal D.AS-SDE-K-4-GD de la casa Festo, mostrada en la Figura 3.17. Las conexiones para la fuente de tensión y las entradas analógicas de la PLC se realizan mediante cuatro clavijas de diferentes colores, indicadas en la Tabla 3.2.

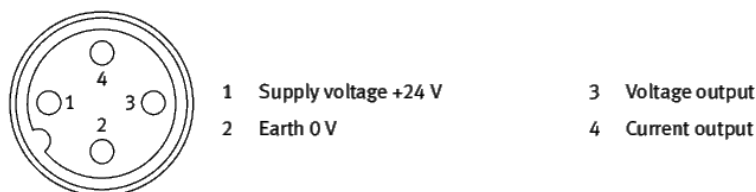


Figura 3.17: Conexiones eléctricas del sensor analógico de presión.

Conexión	Terminal
Alimentación +24 V	Rojo
Alimentación 0 V	Azul
Tensión de salida	Negro
Corriente de salida	Blanco

Tabla 3.2: Conexiones del sensor analógico de presión.

El símbolo neumático utilizado para representar este tipo de sensores se representa en la Figura 3.18.

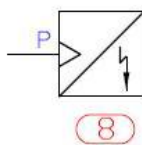


Figura 3.18: Esquema del sensor de presión analógico.

3.3. Sistema de control, supervisión y adquisición de datos

El sistema de control, supervisión y adquisición de datos está constituido por el conjunto de elementos que permiten al equipo estar controlado en todo momento bien de forma autónoma o mediante la supervisión y manipulación de un operador

humano. Lo forman principalmente una PLC (Controlador Lógico Programable) y un ordenador con una aplicación SCADA (Supervisión de Control y Adquisición de Datos), ambos pertenecen a la gama de productos de sistemas de automatización SIMATIC de la multinacional Siemens.

3.3.1. Controlador Lógico Programable (PLC)

Los Controladores Lógicos Programables se introdujeron en la industria en la década de los 70. Se buscaba una alternativa más flexible a los sistemas de control tradicionales basados en circuitos eléctricos con relees, interruptores y otros componentes, que hasta el momento eran utilizados en la industria. Eran diseñados para un control de una secuencia concreta de un sistema de producción específico, pero que no ofrecían adaptabilidad al modificar este sistema en las plantas de fabricación y esto acarreaba grandes gastos económicos y de tiempo cada vez que era necesario cambiar la producción. Se desarrollo este tipo de controladores que ofrecían la posibilidad de ajustarse a prácticamente cualquier técnica.



Figura 3.19: Aspecto físico de S7-300 314C-2 DP.

En este proyecto se ha utilizado el PLC SIMATIC S7-300 con CPU 314C-2 DP mostrado anteriormente en la Figura 3.19. [5]

Esta CPU compacta tiene los siguientes datos técnicos:

- 96 KB de memoria Ram (32000 instrucciones).
- Tiempo de ejecución:
 - 0,1 μ s operaciones de bits.
 - 0,2 μ s operaciones de palabras.
 - 2 μ s operaciones de coma fija.
 - 3 μ s operaciones de coma flotante.
- Contador S7 de 256 bytes, con rango de contaje de 0 a 999.

- Contador IEC tipo SFB.
- Temporizador S7 de 256 bytes, con margen de tiempo de 10 ms a 9,990 s.
- Temporizador IEC tipo SFB.
- 256 bytes de datos.
- Bloques: 1024 en total (DBs, FCs, FBs).
 - OB: capacidad de 16 Kbytes.
 - FB: máximo 512 (de FB0 a FB511).
 - FC: máximo 512 (de FC0 a FC511).
- Áreas de direccionamiento:
 - Digitales: 24 entradas (124.0 a 126.7), 16 salidas (124.0 a 125.7).
 - Analógicas: 4 + 1 entradas (752 a 761), 2 salidas (752 a 755).
- Lenguaje de programación: KOP/FUP/AWL.
- Funciones integradas:
 - Contadores: 4 canales, 24 V/60 kHz.
 - Frecuencímetro: 4 canales, máximo 60 kHz.
 - Salidas de impulso (PCM): 4 canales para modular ancho de pulso, máximo hasta 2,5 kHz.
 - Posicionamiento controlado: 1 canal.
 - Control SFB integrado: Regulador PID.
- Integra un puerto PROFIBUS DP maestro/esclavo.
- Alimentación:
 - 24 Vcc (margen admisible: 20,8 V a 28 V).
 - Consumo de corriente nominal: 800 mA.
 - Potencia disipada: tip. 14 W.

Para alimentar la CPU del S7-300 (además de al sensor de presión y la electroválvula) se precisa de una fuente de alimentación de 24 Vcc. Se ha utilizado la fuente de alimentación PS 307 2A que la gama de productos SIMATIC nos ofrece. Puede verse su aspecto físico en la Figura 3.20.



Figura 3.20: Aspecto físico de la fuente PS 307 2A.

Esta fuente de alimentación cuenta con las siguientes características eléctricas:

- Intensidad de salida 2 A.
- Tensión nominal de salida 24 V c.c., estabilizada, a prueba de cortocircuitos y marcha en vacío.
- Acometida monofásica (tensión nominal de entrada 120/230 Vca, 50/60 Hz).
- Separación eléctrica segura según NE 60 950.
- Puede utilizarse como fuente de alimentación de carga.

3.3.2. Supervisión de control y adquisición de datos (SCADA)

La palabra SCADA es el acrónimo de la expresión en lengua inglesa “Supervisory Control And Data Acquisition”, “Supervisión de control y adquisición de datos” en su traducción al castellano.

A diferencia del resto de elementos que componen el equipo, el SCADA, es una aplicación software, diseñada para trabajar sobre ordenadores en el control de producción. Su función es la de además de controlar procesos, es proporcionar comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y regulando los procesos de manera automática desde un panel PC. También nos aporta toda la información que se genera en el proceso.

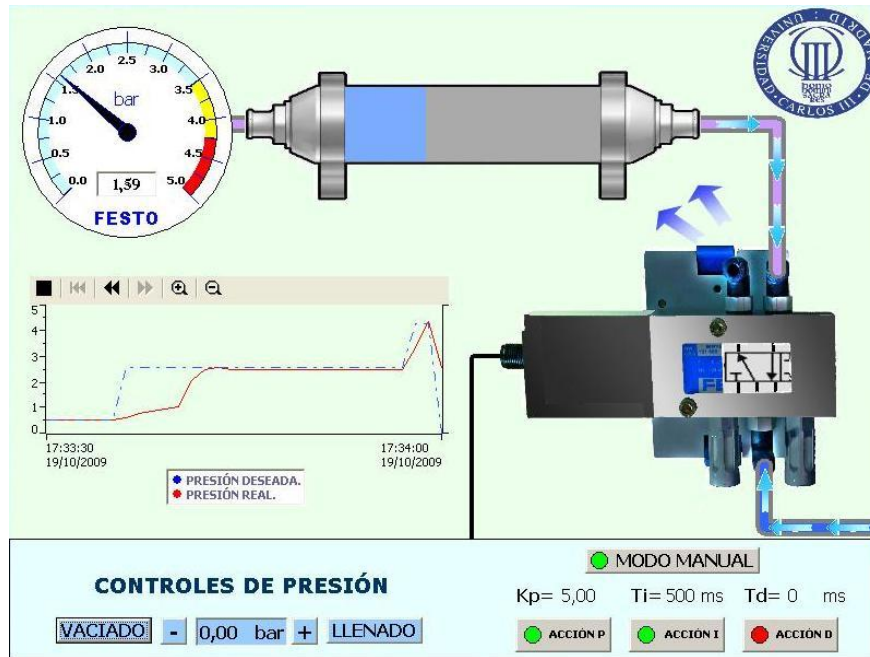


Figura 3.21: Programa SCADA.

Para desarrollar el programa SCADA se ha utilizado el programa WinCC Flexible 2008 [7]. En la Figura 3.21 se puede observar el panel elaborado mediante este software y como siguiendo la definición de SCADA se transmite información gráfica del estado del proceso en tiempo real, se ofrece acceso a los dispositivos de campo pudiendo controlar directamente el proceso y cada uno de los dispositivos pese a que el operario se encuentra a una gran distancia de planta, simplemente con tener acceso a un ordenador comunicado con el autómatas. Además se puede ver como el software cuenta con un gráfico histórico del estado del sistema a lo largo del tiempo, que puede ser consultado por el operario como por ejemplo para identificar un posible error que se haya producido. Para el diseño de la imagen de proceso se ha respetado la norma UNE-EN 61310-1. [6]

4. HARDWARE Y SOFTWARE EN SISTEMAS SCADA

4.1. Introducción

Como se ha explicado anteriormente, un sistema SCADA se compone por tanto de Hardware de entradas y salidas, controladores, un interfaz Hombre-Máquina (HMI), redes de comunicación, base de datos y software.

Si comparásemos un sistema SCADA con el circuito de la Figura 4.1, sin entrar en detalles eléctricos, estando el interruptor S1 cerrado, en función de lo que se ilumine el diodo led, podríamos saber el nivel de tensión que suministra la fuente regulada al resto del circuito. Si profundizamos aún más, podríamos identificar al diodo led y al interruptor S1 como el interfaz Hombre-Máquina (HMI), dónde pulsando el interruptor S1 para ver el estado de la fuente de tensión que observaríamos en el grado de iluminancia del diodo led. Los cables con los que conectamos a la fuente se asemejarían a las comunicaciones del sistema SCADA, y la fuente regulada sería el proceso o dispositivo a controlar. [8]

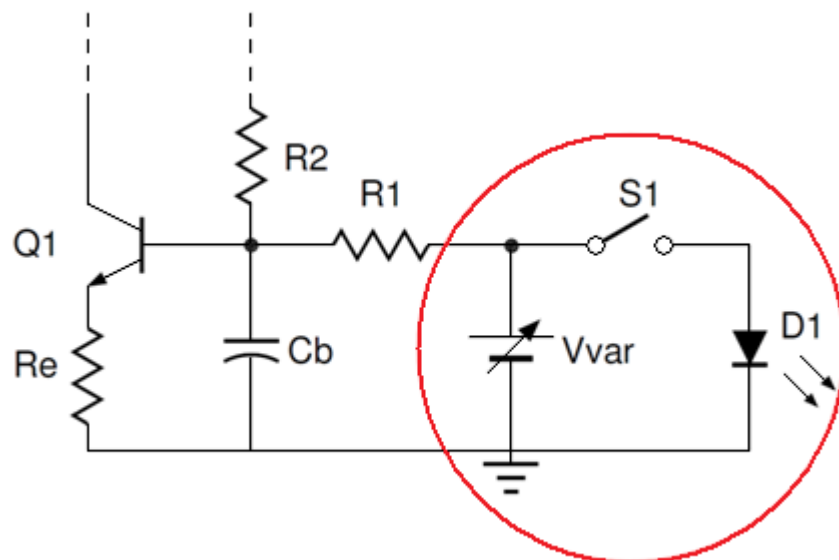


Figura 4.1: Explicación de SCADA

Esta simplificación nos da a entender que un sistema SCADA es algo sin mucha funcionalidad, pero siguiendo con la suposición anterior, si se quisiese añadir que el interfaz HMI esté a muchos metros de distancia en una hipotética situación remota, que en vez de controlar una fuente de alimentación se quisiesen controlar decenas de fuentes u otro tipo de dispositivos que dejaran de ser totalmente eléctricos, harían falta decenas de comunicaciones y el circuito anterior y su comprensión se complicaría enormemente.

Este problema surgió algún día en la industria, y gracias a este tipo de sistemas esto se ve reducido a una aplicación software de visualización en un panel de operador (HMI) y la red de comunicación que lo conecte con el autómatas que a su vez irá conectado a cada uno de los controladores de los dispositivos que se quieren controlar y recoger datos.

Hoy en día el mercado ofrece una gran variedad de hardware y software para configurar sistemas SCADA, con una cada vez mayor compatibilidad entre unos sistemas de una marca y otra, gracias a la creciente concienciación de una necesaria estandarización.

4.2. Hardware

4.2.1. Introducción

A pesar de que en los sistemas SCADA tiene un gran peso la parte software, el cual no requiere de grandes exigencias de hardware, no por ello hay que menospreciar a los elementos físicos que lo componen.

Un sistema SCADA tradicional, en cuanto a hardware, se compone de un interfaz hombre-máquina (HMI, MMI), un ordenador central o MTU (Master Terminal Unit), una red de comunicación y una instrumentación de campo. Dependiendo de las necesidades, o de las exigencias, pueden ser necesarios más dispositivos como por ejemplo ordenadores remotos o RTU's (Remote Terminals Units), servidores, dispositivos de almacenamiento de datos, etc.

4.2.2. Elementos utilizados

Para la realización del sistema SCADA de este proyecto han sido necesario un ordenador que hace las funciones de interfaz HMI y unidad central, una comunicación basada en un adaptador MPI a USB entre el

ordenador y la PLC que a su vez trabaja como unidad remota junto a la instrumentación de campo formada por un sensor de presión y una válvula proporcional.

a) Interfaz HMI y unidad central MTU.

La unidad central es básicamente un ordenador personal marca ASUS con las siguientes características:

- Tipo de procesador Procesador Intel® Pentium® Dual E2200 @2.20 GHz.
- Chipset Chipset Intel® G41 Express.
- Memoria Ram de 2 Gb.
- Unidades internas Disco duro SATA 3G de 640 GB (7200 rpm).
- Tarjeta gráfica ATI Radeon HD 4350 con tecnología Avivo.
- Puertos de E/S externos 6 puertos USB 2.0.
- Interfaz de red Interface de red Ethernet 10/100BT integrado. [9]

Este ordenador también sirve como soporte para la interfaz HMI, cuya representación sinóptica corre a cargo de una pantalla LCD de 19" de marca ACER modelo X193HQ, mostrada en la Figura 4.2. [10]



Figura 4.2: Pantalla LCD

Pese a que lo más común en los sistemas HMI modernos es que la interacción entre usuario y el proceso sea mediante un panel táctil y opcionalmente algún panel de botones, en este caso debido a los recursos

disponibles el sistema se ayuda de un teclado y un ratón convencional comunicados por puerto USB con la CPU.

b) Comunicación.

La comunicación establecida entre el ordenador (MTU) y el autómatas (RTU) es del tipo topología punto a punto, consistente en una relación Maestro-Eslavo. Un solo elemento remoto, la PLC, está conectado al sistema de control, la CPU, mediante una línea de comunicación.

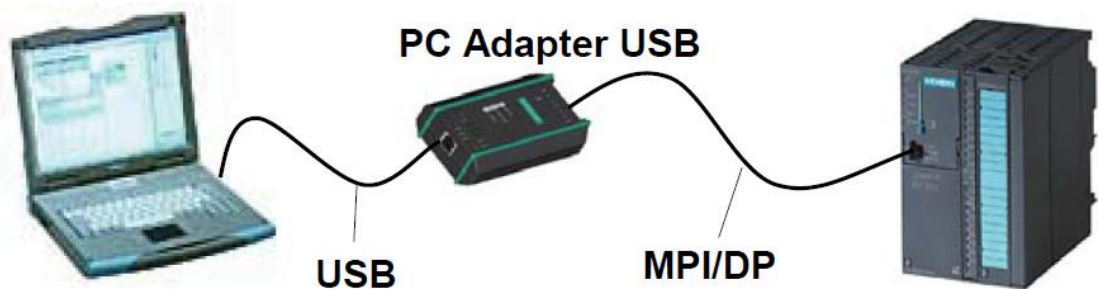


Figura 4.3: Comunicación CPU-PLC

Esta línea de comunicación se basa en un adaptador que conecta el puerto USB del PC con el MPI/DP del S7-300, tal y como se puede ver en la Figura 4.3. Con este adaptador se evita tener que instalar alguna tarjeta adicional en el PC, que además es un problema en ordenadores no ampliables como los portátiles. Sólo requiere de un puerto USB y una unidad CD-ROM.

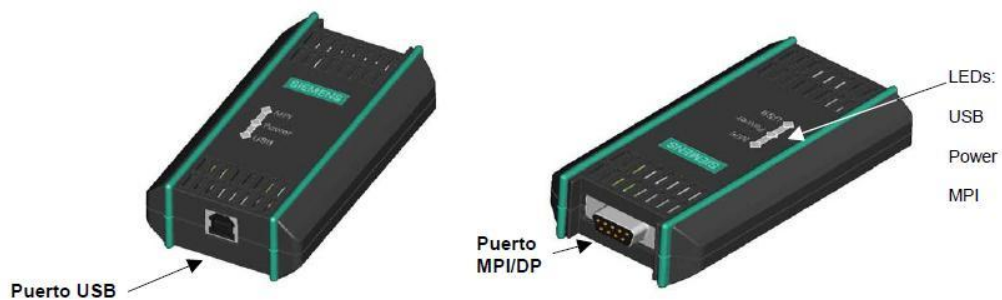


Figura 4.4: PC Adapter USB

Este adaptador es el SIMATIC PC ADAPTER USB de la casa SIEMENS, mostrado en la Figura 4.4. Puede emplearse para la conexión de redes MPI, PROFIBUS y a partir de la versión 1.1 de firmware en redes PPI homogéneas, en la Tabla 4.1 se muestran las velocidades de transferencia soportadas para cada tipo de red. Tiene las siguientes características:

- Detección automática del perfil de bus.
- Hasta 16 enlaces de comunicación, de los cuales, como máximo, 4 esclavo (enlaces DP/T).
- Soporte de routing (selección del camino por el que se envían los datos en una red de ordenadores).
- Soporta esclavos norma DPV1 (a partir de la versión firmware v1.3) mediante:
 - Asignación de direcciones de esclavo.
 - Diagnóstico de dispositivos.
 - Escribir/leer registro.

Velocidad de transferencia	MPI	PPI	PROFIBUS			
			DP	Estándar	Universal	Personalizado
9.600 bits/s	✗	✓	✓	✓	✓	✓
19.200 bits/s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45.450 bits/s	✗	✗	✓	✓	✗	✓
93.750 bits/s	✗	✗	✓	✓	✓	✓
187.500 bits/s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500 Kbits/s	✗	✗	✓	✓	✓	✓
1.500 Kbits/s	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Tabla 4.1: Perfiles de bus soportados y velocidades de transferencia.

c) Unidades remotas RTU's.

Las RTU's son el conjunto de elementos dedicados a labores de control y/o supervisión del sistema, alejados del centro de control o MTU, y comunicados con éste mediante algún canal de comunicación. En esta clasificación se pueden distinguir varios elementos:

- RTU (Remote Terminal Unit): especializados en la comunicación.
- PLC (Programmable Logic Controller): tareas generales de control.
- IED (Intelligent Electronic Device): tareas específicas de control. [11]

Las unidades RTU suelen ser ordenadores especiales que controlan directamente el proceso mediante tarjetas convertidoras adecuadas o que se comunican con elementos de control como PLC's o reguladores mediante los protocolos adecuados. De construcción más fuerte, operativos en un mayor rango de temperaturas que los ordenadores normales y mayor robustez

eléctrica. Suelen manejar software elaborado en lenguajes de alto nivel como C o VisualBasic, que les permite interpretar los comandos provenientes de la MTU.

Las PLC's con el tiempo han evolucionado convirtiéndose en módulos ampliables con distintas prestaciones que permiten configurar controladores apropiados para cada proceso. Entre ellos se encuentran los procesadores de comunicaciones que han hecho desaparecer a los RTU específicos, quedando estos incluidos en la CPU del PLC.

Los IED, llamados periféricos inteligentes capaces de tomar decisiones por sí mismos. En esta familia se encuentran elementos como los reguladores, variadores de frecuencia o transductores.

Siguiendo estas definiciones, los dispositivos de este proyecto que quedarían encuadrados en este tipo de hardware serían la PLC, y el sensor de presión.

4.3. Software

4.3.1. Introducción

Los paquetes de software SCADA son de tipo HMI, suelen ser de pago y para poder trabajar con ellos se deben adquirir licencias de utilización. Cualquier programa SCADA tendrá dos elementos software bien diferenciados, uno de desarrollo y otro de ejecución o runtime.

Los programas de desarrollo abarcan todas las utilidades de creación y edición de las ventanas de la aplicación de control, así como de sus características (textos, dibujos, colores, propiedades de los objetos), por tanto estos programas tendrán herramientas para la creación de gráficos, botones, barras desplazadoras, displays, indicadores...

Estos programas se ejecutan en un ordenador o terminal gráfico como un Panel PC y contienen una serie de elementos que le permiten comunicarse con los dispositivos de control de planta y los elementos de gestión mediante protocolos de comunicación como Profibus, Can-Bus o Ethernet. Estos programas se denominan controladores o drivers de comunicaciones, y suelen estar incluidos en estos paquetes software.

Alguno de los programas más utilizados en el panorama actual son WinCC de Siemens, Labview de National Instruments, RSView de Rockwell Automation, Sysmac SCS de Omron o Monitor Pro de Schneider Electric. No obstante el mercado nos ofrece una gran variedad de productos con notables prestaciones entre unos y otros programas. Algunos de estos programas ofrecen licencias separadas para la parte de desarrollo, runtime o en su conjunto. [12]

4.3.2. Elementos utilizados

Para el desarrollo de este trabajo se ha seleccionado el programa WinCC Flexible 2008, ya que reúne una serie de características bastante interesantes, además de ser junto a Labview las dos soluciones software más extendidas hoy en día. El aspecto general de la aplicación de desarrollo se puede ver en la Figura 4.5. A diferencia de Labview, WinCC ofrece herramientas más sencillas y bastante adecuadas para el desarrollo de procesos, mientras que Labview parece estar más enfocado a la adquisición de datos de instrumentación y cálculos numéricos. Otra ventaja interesante es la fácil integración con el PLC Simatic también de la casa SIEMENS lo cual facilita extraordinariamente la comunicación entre ambos.

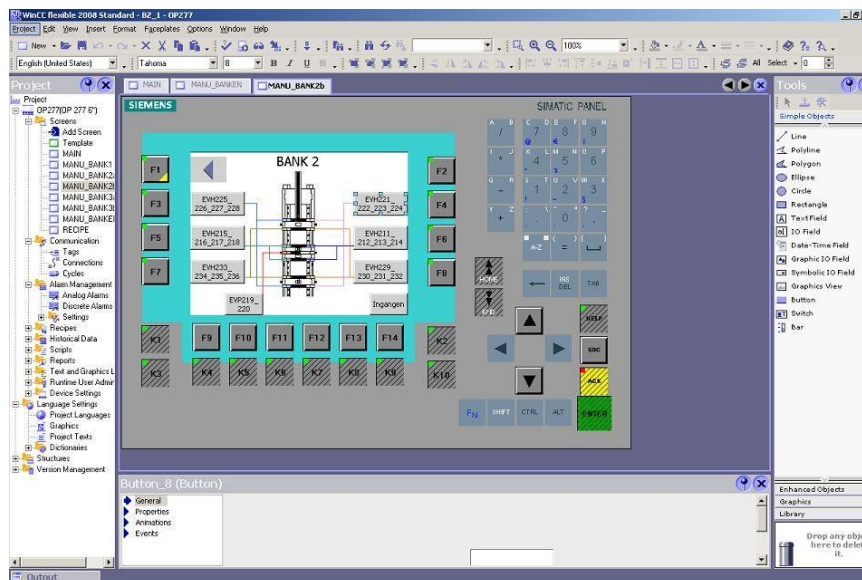


Figura 4.5: Aspecto general de la aplicación de desarrollo de WinCC Flexible 2008.

A continuación se enuncian algunas de las características más importantes con que cuenta este software SCADA:

- Interfaz de configuración innovadora y basada en los últimos avances en tecnología de software
- Librerías de bloques: Los faceplates son libremente definibles, reutilizables y modificables desde un punto central
- Bloques faceplate dinámicos
- Herramientas inteligentes como la configuración gráfica de la navegación por imágenes y objetos animados, la cómoda configuración de datos en masa (p. ej. editor de variables), etc.
- Protección contra el acceso mediante identificador de usuario y contraseña
- Administración de recetas
- Sistema de informes
- Soporte lingüístico para la aplicación en todo el mundo:
 - 32 idiomas administrables en un proyecto
 - Librería para textos en varios idiomas y traducción automática
 - Importación/exportación simple de textos para traducirlos
- Ampliable individualmente mediante opciones:
 - Conceptos Sm@rt Client/Server
 - Servicio técnico y diagnóstico mediante web
 - Comunicación con servidor OPC
 - Diagnóstico del proceso
 - Registro y trazabilidad de configuraciones e intervenciones del operador

Este producto ofrece una serie de herramientas gráficas bastante adecuadas para la medición de procesos como indicadores manométricos, barras graduales, medidores, indicadores numéricos e indicadores gráficos XY. En todos ellos se puede configurar la escala, el fondo de escala, tipo de visualización, formato y tamaño de numeración, colores, niveles de máximo y mínimo y zonas de aviso.

Los objetos pueden guardarse en librerías de forma centralizada y estructurada para ser reutilizados en diferentes proyectos. Una gran cantidad de objetos dinámicos y escalables, con los que pueden ensamblarse bloques faceplate, forman parte de WinCC flexible. Los cambios en los bloques para visualización sólo necesitan hacerse en un punto central. De este modo tendrán efecto allí donde se utilice el bloque. Esto no sólo ahorra tiempo, sino que también garantiza la coherencia de los datos.

Los avisos de WinCC flexible pueden formarse como avisos de bit, avisos analógicos y avisos mediante procedimiento de notificación por telegramas Alarm_S con SIMATIC S7. El comportamiento de acuse y la representación de las clases de aviso se pueden determinar a través de clases de aviso definibles a discreción. El archivo de valores de proceso y avisos con WinCC flexible/Archives sirve para el registro y tratamiento de datos de proceso. La evolución del proceso se documenta, la tasa de carga o la calidad de los productos puede controlarse y se evidencian los estados de fallo que se repiten.

Este software permite emitir listados e informes de forma controlada por tiempo o por eventos. La maquetación es también personalizable. Si es necesario puede activarse una protección por contraseña contra el acceso. Se da la posibilidad de crear grupos de usuarios con derechos específicos.

El programa cuenta con la utilidad Recipes, que sirve para administrar recetas que contienen datos de máquinas o de producción relacionados. Mediante esta aplicación se pueden preasignar datos. Los datos de un registro pueden transmitirse, por ejemplo, del panel de mando al PLC para cambiar la producción a otra variante del producto.

Los últimos modelos de Panel-PCs de la gama SIMATIC son compatibles con PROFINET IO, lo que permite desarrollar SCADA en tiempo real. De esta forma, sobre la base de Industrial Ethernet, ahora son posibles también manejos de tiempo crítico que se ejecutan mediante PROFIBUS con las teclas directas DP.

WinCC Flexible dispone además de varias opciones instaladas mediante ampliaciones que potencian aún más este producto.

- La aplicación Sm@rtService permite acceder desde un PC a Panel-PCs compatibles con PROFINET/Ethernet mediante Internet Explorer. Además, desde el panel puede enviarse automáticamente un correo electrónico vía servidor SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) al personal de mantenimiento. Una pasarela de correo electrónico/SMS permite acceder a redes convencionales para enviar un mensaje SMS a un móvil en situaciones críticas.
- Los Panel-PCs con la opción OPC-Server pueden comunicarse vía Ethernet y TCP/IP con cualquier aplicación apta para OPC (p. ej.: aplicaciones MES, ERP u Office).
- Con la opción Sm@rtAccess, los Panel-PCs compatibles con PROFINET se comunican entre sí vía PROFINET/Ethernet o vía intranet/Internet.
- La herramienta ProAgent permite el diagnóstico selectivo de proceso en máquinas e instalaciones controladas con SIMATIC S7. Cuando se produce un fallo en el proceso, ProAgent determina la información sobre el lugar y la causa del fallo y ayuda a corregirlo. [13]

5. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA SCADA

5.1. Introducción

En este capítulo se detallará de una manera ilustrativa y fácilmente comprensible cada uno de los pasos que se han seguido para configurar el sistema SCADA utilizando el programa WinCC Flexible 2008.

Este sistema SCADA se integra con el PLC que paralelamente ha sido programado en otro proyecto destinado al control del circuito neumático mediante el módulo PID del mismo. Se describirá brevemente en este capítulo la programación del PLC para introducir posteriormente la programación del SCADA.

5.2. Programación del PLC

La programación del S7-300 se realizó con el software Simatic Step7 [14], que está especialmente diseñado para programar autómatas Siemens Simatic como era el caso. Este software soporta programación en los lenguajes KOP (contactos), FUP (funciones lógicas) y AWL (código de instrucciones). El lenguaje en que se desarrolló el proyecto fue en KOP. [15]

La estrategia seguida para desarrollar el control del circuito neumático es el diseño de un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). La función de este tipo de controladores es la de corregir el error entre un valor obtenido y el que se pretende obtener, calculándolo y a continuación sacando una acción correctora que ajuste el proceso de la mejor forma posible, siguiendo el diagrama de bloques de la Figura 5.1. El ajuste se realiza mediante un algoritmo de cálculo con tres parámetros distintos, también denominados acciones, que son: proporcional, integral, y derivativo. La acción de control proporcional (P) da una salida del controlador proporcional al error. La acción integral (I) proporciona una salida del controlador proporcional al error acumulado. La acción de control derivativa (D) determina la velocidad con que se corrige el error que se produce. Estas tres acciones pueden ser asociadas entre sí dando lugar a controladores de los siguientes tipos: P, I, PI, PD y PID.

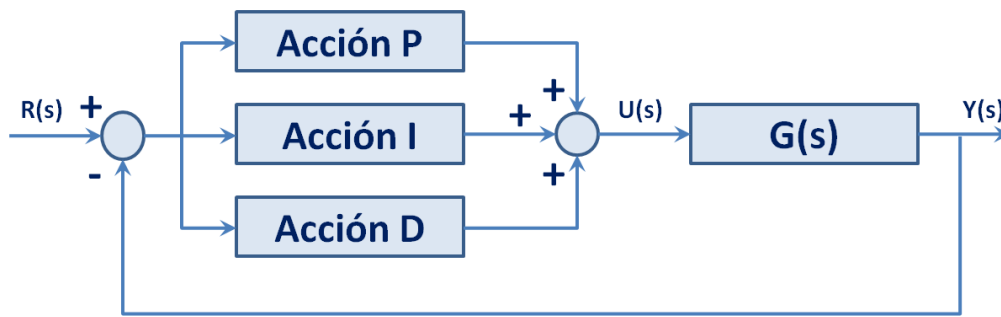


Figura 5.1: Diagrama de bloques de un regulador PID

Este regulador se programa mediante el bloque de funciones PID FB41 que se muestra en la Figura 5.2, dónde se configuran los parámetros necesarios para controlar el sistema mediante variables ajustables desde el sistema HMI.

Los parámetros que constituyen la conexión son "PV_PER" (valor real de periferia) y "LMN_PER" (valor manipulado de periferia), que son respectivamente la entrada y la salida del regulador y se corresponden con la variable de entrada analógica PEW754 (señal 0-20 mA del sensor de presión) y la salida analógica PAW754 (señal 0-10 V de control de la válvula proporcional).

La acción P se activa con el parámetro "P_SEL", y su valor se introduce a través de "GAIN". La acción de control I se selecciona con "I_SEL" y el valor se ajusta en "TI". Mientras que la acción D se permite activando "D_SEL" y su valor se introduce en "TD".

Otros parámetros utilizados son "COM_RST", que pone a cero los valores de salida del regulador y se activa cuando se fija a "0" el bit M160.0, "MAN_ON" que se utiliza para forzar un valor de manipulación en "LMN_PER" al ser activado, que se introduce a través del parámetro "MAN", y finalmente el parámetro "SP_INT", donde se ajusta el valor que se desea obtener. El parámetro "ENO" se utiliza para iluminar un led en el autómatas que indique que el regulador está activo.

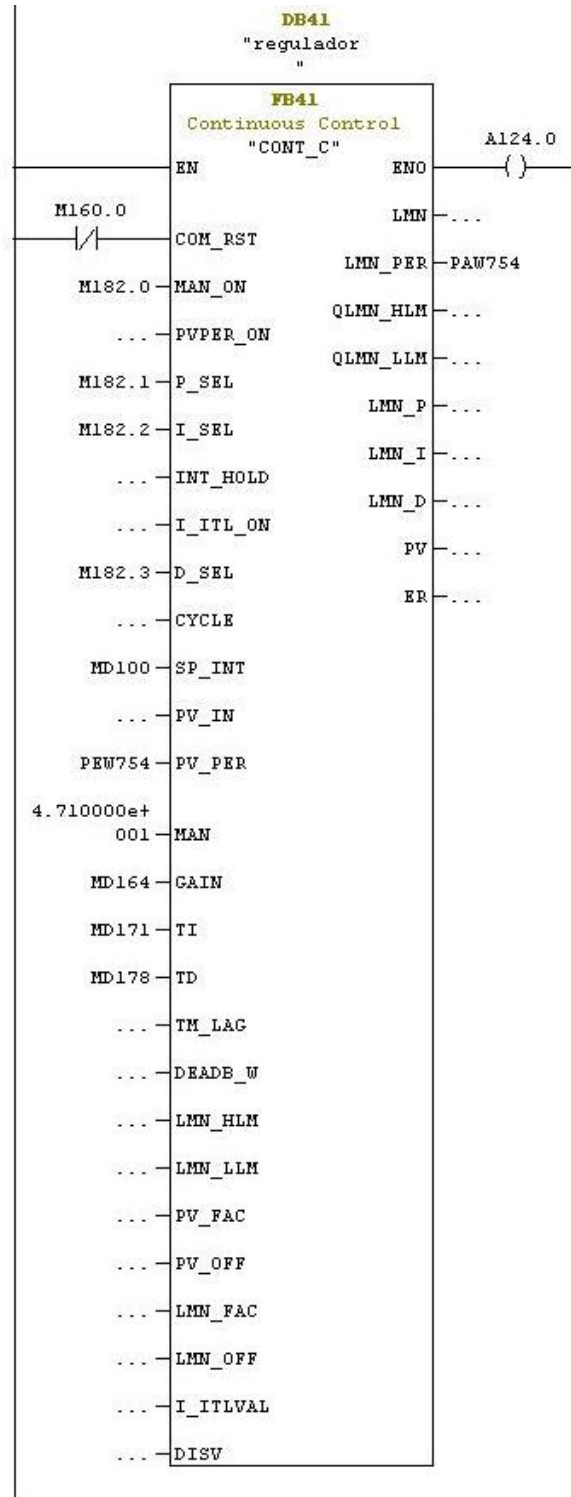


Figura 5.2: Bloque de funciones FB41 del regulador PID.

Para que la variable de salida del sensor analógico de presión pueda ser tratada en el sistema HMI se puede trabajar con la entrada PV o bien transformar el tipo de dato de periferia Word a real tal y como se representa en la Figura 5.3. El proceso consiste en mover el valor de periferia a una variable entera Word (16 bits) para poder

trabajar con ella. Posteriormente se transforma de Word a Doble Word (32 bits), lo que permitirá realizar una nueva conversión a tipo de datos Real (32 bits también). Seguidamente se realiza un escalado lineal como se muestra en la Figura 5.4.

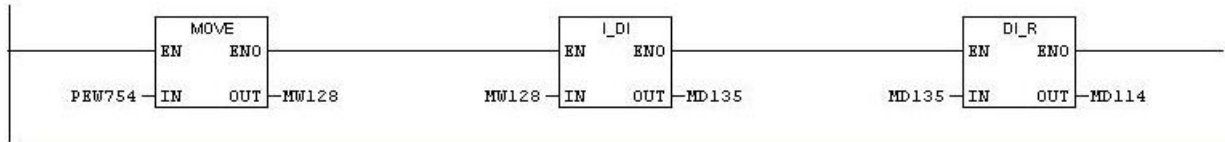


Figura 5.3: Transformación de valor de periferia a real.

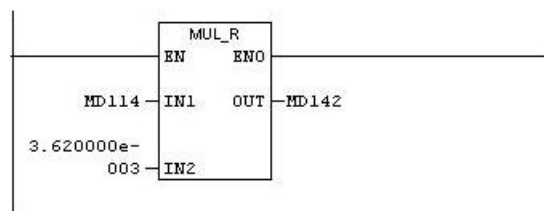


Figura 5.4: Escalado lineal del valor real de periferia.

En el código se insertaron líneas de código destinadas únicamente a habilitar funcionalidades en la pantalla HMI. Mediante el código mostrado en la Figura 5.5 se pretende informar al software SCADA en cuál de las tres posiciones posibles se encuentra la válvula proporcional. El método consiste en calcular el error comparando el valor deseado por el usuario y el valor obtenido del sensor de presión y si la diferencia entre estos es inferior a un valor considerado como tolerancia (0.2) se estima que la válvula se encuentra en la posición en que todas las vías están bloqueadas (Figura 3.10 posición central). En cambio si la diferencia es superior al valor de tolerancia se compara valor real con el deseado de tal forma que si el valor real es menor al deseado se supone que la válvula se encuentra en la posición en que se comunican por una parte las vías 4 y 5 y por otra la 1 y 2 (Figura 3.10 posición derecha), mientras que si el valor real es mayor al deseado se considera que la válvula se posiciona comunicando las vías 1 y 4 y las vías 2 y 3 (Figura 3.10 posición izquierda).

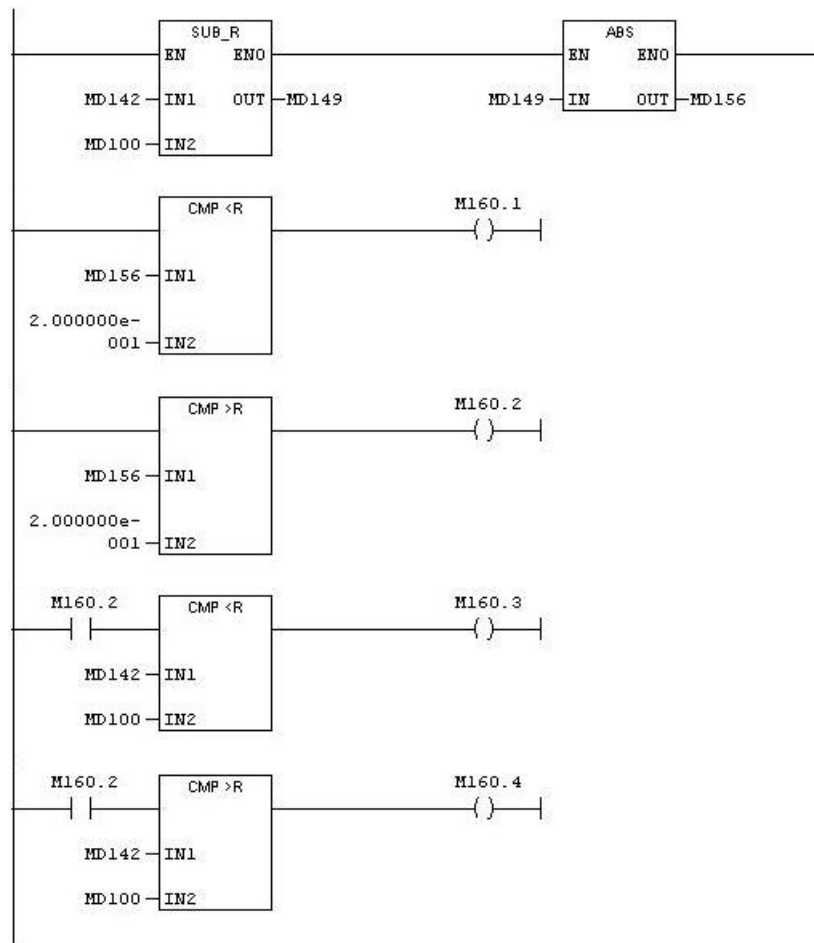


Figura 5.5: Determinación de la posición de la válvula proporcional.

5.3. Configuración del sistema SCADA

El paquete de software WinCC Flexible se compone de dos componentes de software diferentes, el de configuración y el Runtime:

- WinCC Flexible Compact/Standard/Advanced: Permite realizar todas y cada una de las tareas de configuración necesarias. Con este componente se realiza la edición de las pantallas que se visualizarán posteriormente.
- Wincc Flexible Runtime: Es el componente de software encargado de visualizar procesos.

Este paquete de software es un sistema de ingeniería diseñado para la configuración de todos y cada uno de los paneles de operador asociados con este sistema así como cualquier sistema PC. El programa presenta la estructura modular mostrada en la Figura 5.6, desde WinCC Micro destinado a configurar únicamente

micropaneles, hasta WinCC Advanced que es la versión que soporta prácticamente cualquier opción. Ya que la plataforma de visualización para el Runtime va a ser un PC con Windows XP es necesario utilizar la versión Advanced. [16]

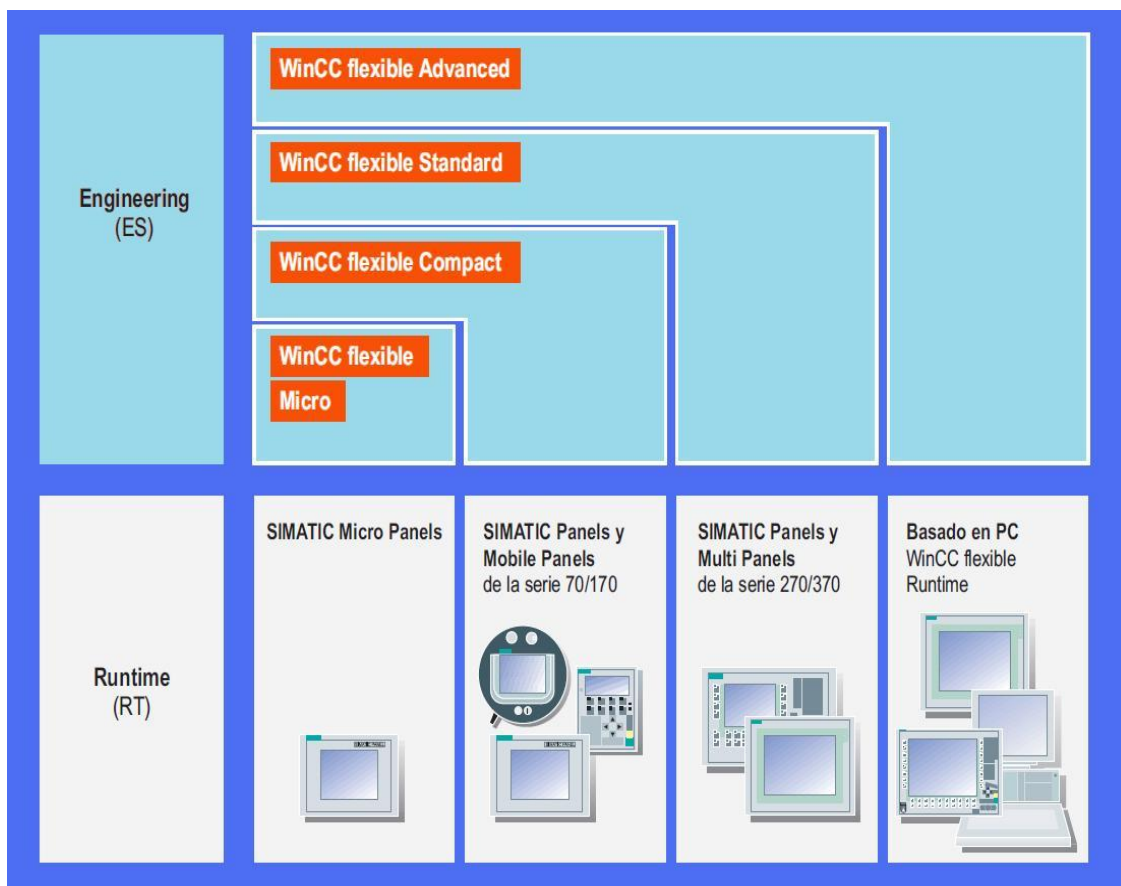


Figura 5.6: Versiones de WinCC Flexible y sistemas de destino.

Para la creación de un nuevo proyecto, WinCC cuenta con un asistente que ayuda al programador a configurar fácilmente el tipo de pantalla táctil a utilizar, el tipo de conexión, el tipo de PLC, el número de imágenes y las librerías disponibles dependiendo del tipo de HMI. De esta forma una vez creado el proyecto bastará con integrar el mismo con el proyecto de Step7 una vez para poder contar con todas sus variables.

Para realizar el proyecto con este asistente, primeramente se deberá seleccionar “Crear un proyecto nuevo con el asistente de proyectos” como se muestra en la Figura 5.7.

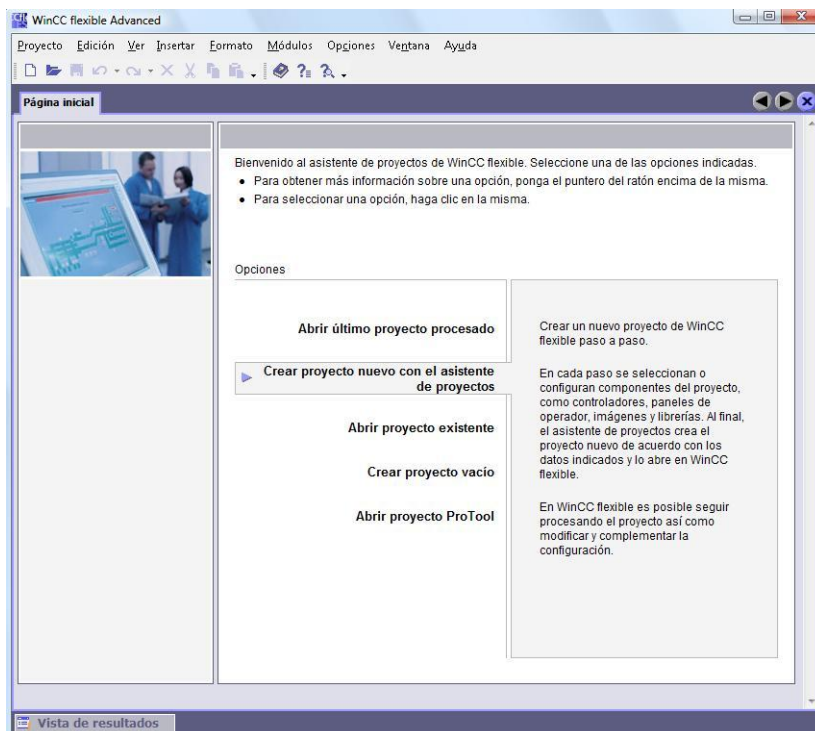


Figura 5.7: Creación de un proyecto nuevo con el asistente de WinCC Flexible.

Seguidamente se selecciona el tipo de proyecto, que en este caso se trataría de un ordenador conectado a un PLC, por lo que se selecciona la opción una “Máquina pequeña”, que muestra gráficamente esta configuración como se puede ver en la Figura 5.8.

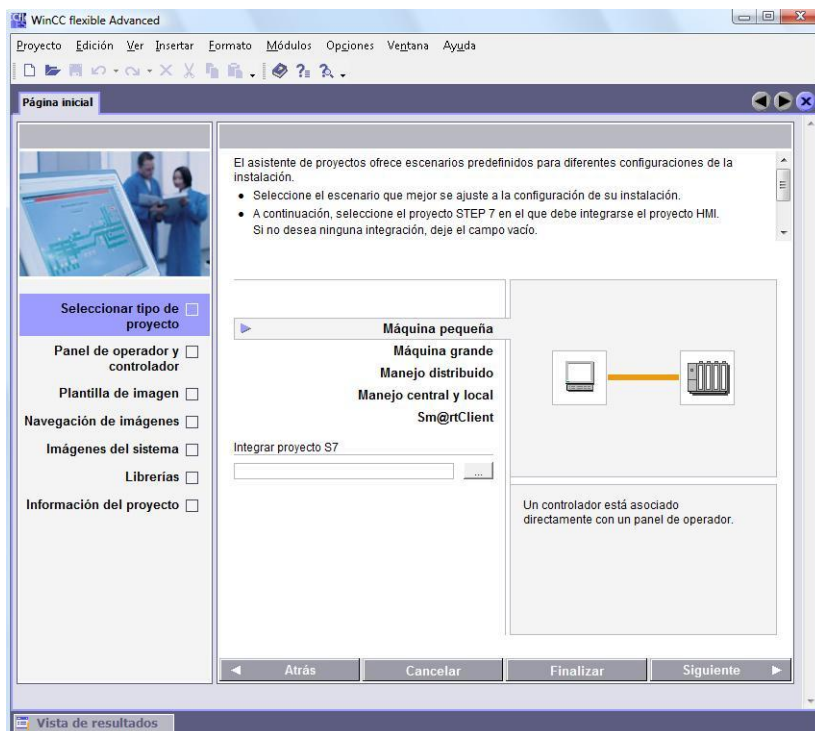


Figura 5.8: Selección del tipo de proyecto con el asistente de WinCC Flexible.

Tras pulsar Siguiente se selecciona el panel de operador, el tipo de conexión y el controlador. Como panel de operador se selecciona WinCC Flexible utilizado desde un PC, la conexión será del tipo MPI/DP y el controlador será SIMATIC S7 300, quedando la configuración mostrada en la Figura 5.9.

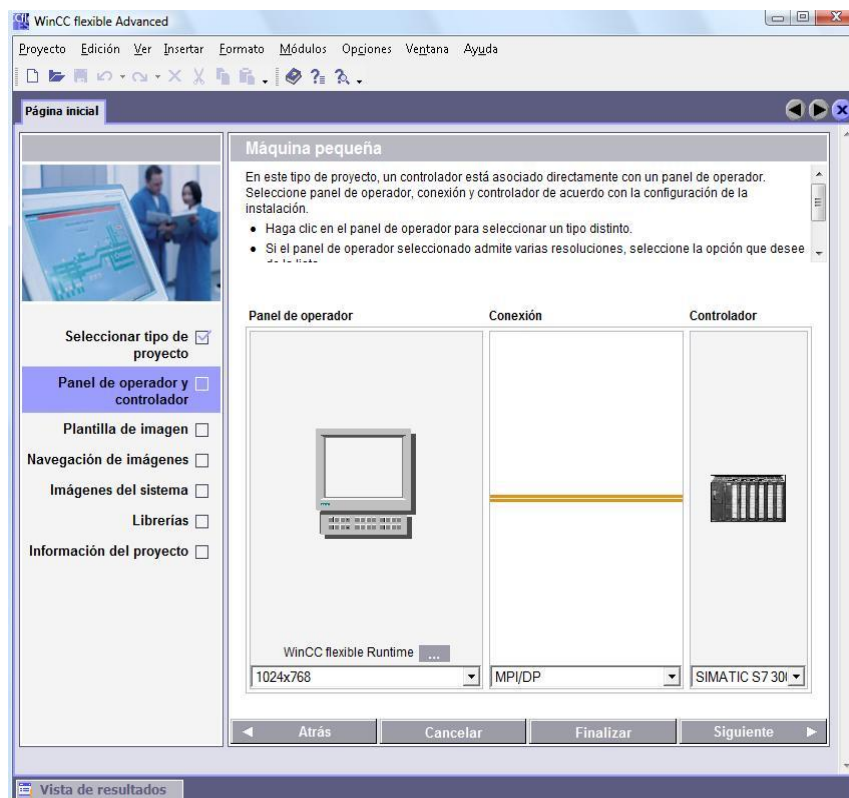


Figura 5.9: Selección del panel de operador, tipo de conexión y controlador.

Los siguientes pasos se pasarán por alto puesto que solo se necesita de una imagen sin formato y no es necesaria la navegación de imágenes. Por tanto se continuará hasta el paso de “Información del proyecto”, dónde se introduce el nombre del proyecto y el nombre de quien lo ha creado (Figura 5.10).

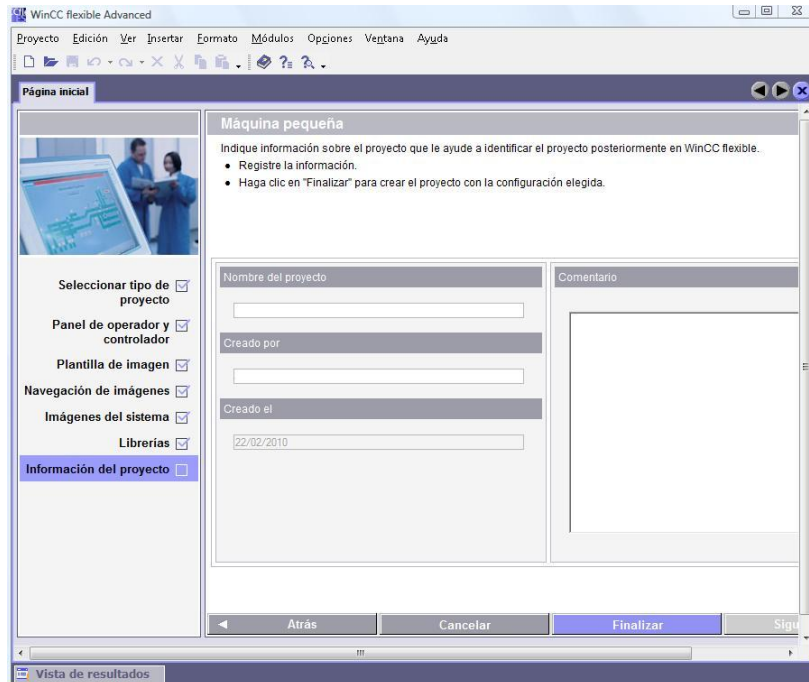


Figura 5.10: Información del proyecto que se va a crear.

El programa WinCC Flexible tiene una interfaz típica de Windows. Su entorno de trabajo se compone de varios elementos que el programa permite mostrar u ocultar, al igual que es posible colocarlos en la pantalla en el lugar que resulte más cómodo al usuario. En la Figura 5.11 se localizan los diferentes elementos que se han utilizado de manera general para desarrollar el proyecto. A continuación se describe la función de cada uno de estos elementos:

- **Menús y barras de herramientas:** Permite acceder a todas las funciones de que dispone el programa.
- **Ventana del proyecto:** Da acceso a todos los elementos que pueden ser parte de un proyecto desglosados estructuralmente en forma de árbol.
- **Ventana de herramientas:** Contiene librerías de objetos gráficos, elementos de mando o campos de texto que se pueden insertar en las imágenes creadas. Dentro de este elemento se encuentra la librería, que ofrece además de los objetos proporcionados por el programa otros creados por los distintos usuarios que utilicen el programa.
- **Área de trabajo:** Es aquí donde se crea y se edita la imagen final que se pretende crear. Es el único elemento del programa que no se puede desplazar ni ocultar.
- **Ventana de propiedades:** Este elemento permite editar las propiedades configurables de cada uno de los objetos.

- **Ventana de resultados:** Es otro de los elementos más importantes del programa. Se puede observar su aspecto en la Figura 5.12. La ventana de resultados muestra avisos del sistema generados, por ejemplo, al comprobar un proyecto.

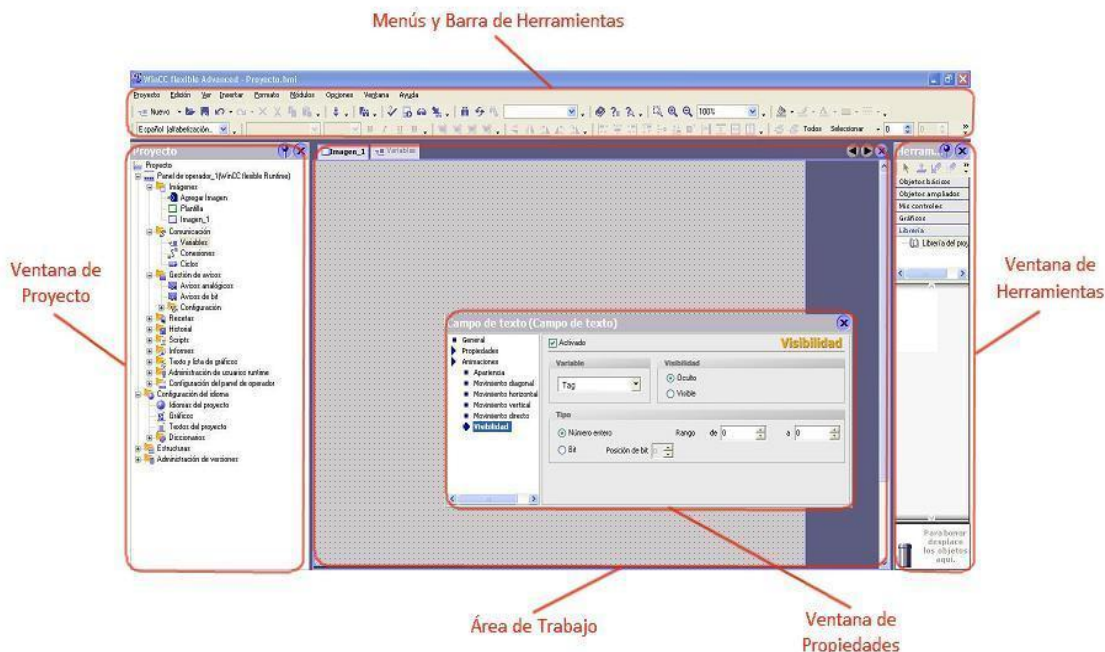


Figura 5.11: Elementos del programa WinCC Flexible Advance

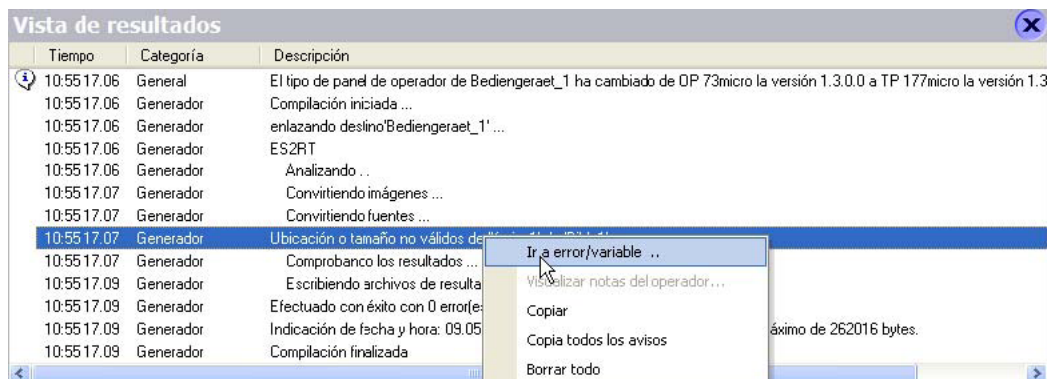


Figura 5.12: Ventana de resultados.

5.3.1. Creación de variables

Las variables se agregan en el editor "Variables" pinchando con el botón secundario y pulsando en "Agregar Variable", como se puede ver en la Figura 5.13. Al crearlas, las variables nacen con una configuración por defecto de los distintos parámetros.

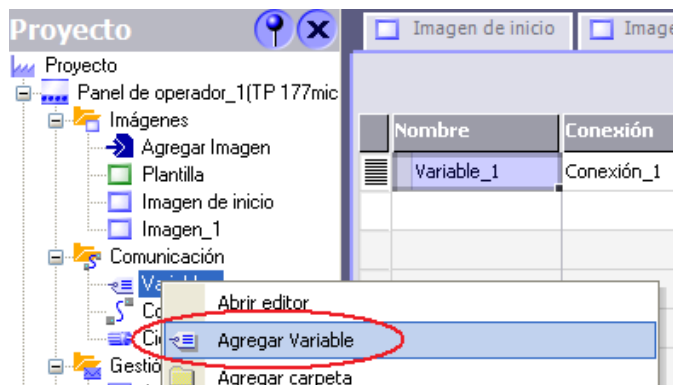


Figura 5.13: Agregar variable.

La configuración de las variables se puede ajustar a las necesidades del proyecto en el editor "Variables" desde la ventana de propiedades. En la pestaña "General" se configuran parámetros como el nombre de la variable, el tipo de dato, el modo de adquisición y el ciclo de adquisición si es que tiene. Pulsando la pestaña Propiedades se despliega un submenú que permite definir parámetros como el direccionamiento de la variable, límites de su valor, escala lineal o su valor inicial.

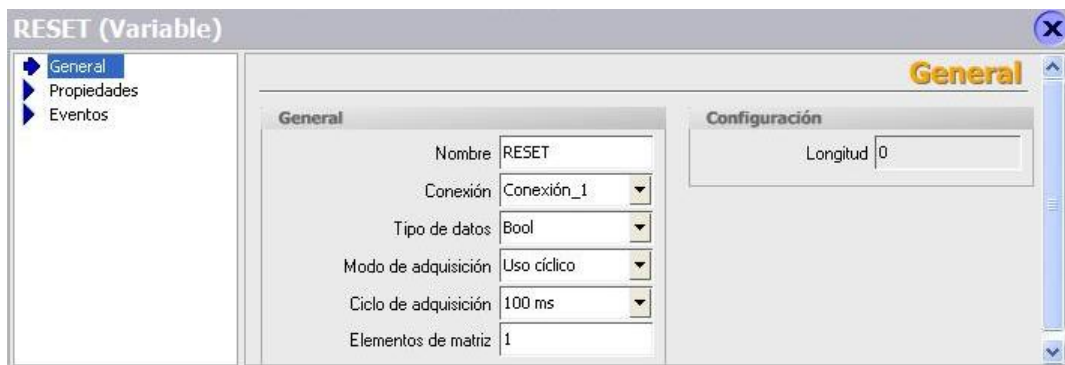


Figura 5.14: Configuración General de variables.

En la programación del programa SCADA se necesitó recurrir a 16 variables de diferentes tipos de datos. Algunas de ellas se corresponden con las utilizadas en la programación del PLC, ya que es necesario modificarlas directamente desde el sistema HMI, o bien ser leídas directamente desde el PLC. Los tipos de datos utilizados son del tipo real (valor de 4 bytes que pueden ser representados con notación de coma flotante), booleano (valores de 1 bit que representan falso o verdadero) y tiempo (valor de 4 bytes con signo que indica el valor de tiempo en milisegundos). A continuación, en la Tabla 5.1 se pueden observar las variables utilizadas, la dirección de memoria en que se encuentran, el tipo de dato de que se trata y el modo de adquisición.

NOMBRE	TIPO DATOS	DIRECCIÓN	MODO ADQ.
Vconsigna2	Real	MD 107	Sobre demanda
Vconsigna	Real	MD 100	Sobre demanda
P_Sel	Booleano	M 182.1	Sobre demanda
D_Sel	Booleano	M 182.3	Sobre demanda
I_Sel	Booleano	M 182.2	Sobre demanda
sensor	Real	MD 114	Cíclico continuo
ajustado	Booleano	M 160.1	Uso cíclico
Td	Time	MD 178	Sobre demanda
Kp	Real	MD 164	Sobre demanda
diferente	Booleano	M 160.2	Uso cíclico
valvula1	Booleano	M 160.3	Uso cíclico
RESET	Booleano	M 160.0	Uso cíclico
valvula2	Booleano	M 160.4	Uso cíclico
Control_Man	Booleano	M 182.0	Sobre demanda
Ti	Time	MD 171	Sobre demanda
sensor_escalado	Real	MD 121	Sobre demanda

Tabla 5.1: Configuración de variables del sistema.

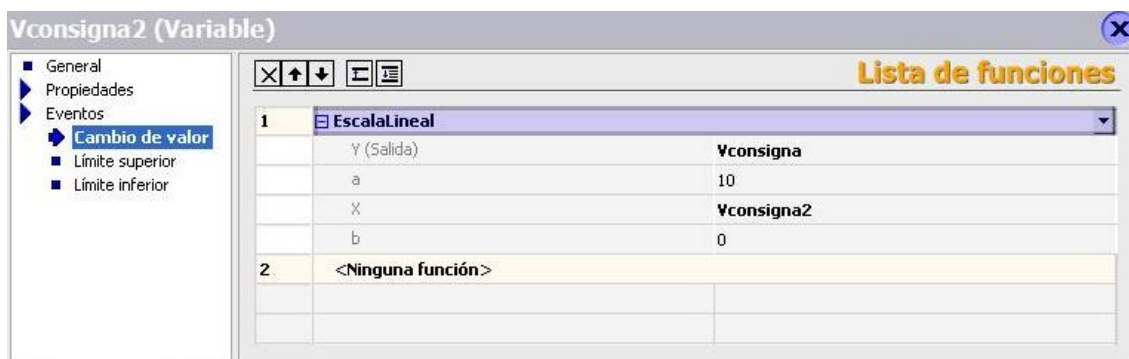


Figura 5.15: Configuración de cambio de valor por escala lineal de variables.

Todas las variables a excepción de “Vconsigna2” y “sensor_escalado” se comunican directamente con el PLC. La función de estas variables es la de realizar una escala lineal, para que estos valores puedan ser interpretado de una forma lógica por el usuario. La variable “Vconsigna2” se ha utilizado para que el usuario introduzca los datos de presión en unidades bar, ya que la variable “Vconsigna” está asociada a la entrada del bloque de función PID SP_INT (Figura 5.2) correspondiente al valor deseado, que expresa en porcentaje el rango de presión que se desea para que pueda ser comparado por el regulador con el valor devuelto por el sensor en la entrada PV también indicada en porcentaje. Esto se consigue mediante la pestaña “Cambio de valor” en el menú “Eventos”, seleccionando la operación “EscalaLineal” de la ventana de propiedades como se muestra en Figura 5.15. Además, al estar

limitada la presión del sistema a 5 bar, la variable “Vconsigna2” ha sido limitada en el rango de 0 a 5 bar. Esto se realiza desde la pestaña “Límites” en el menú Propiedades de la ventana de propiedades.

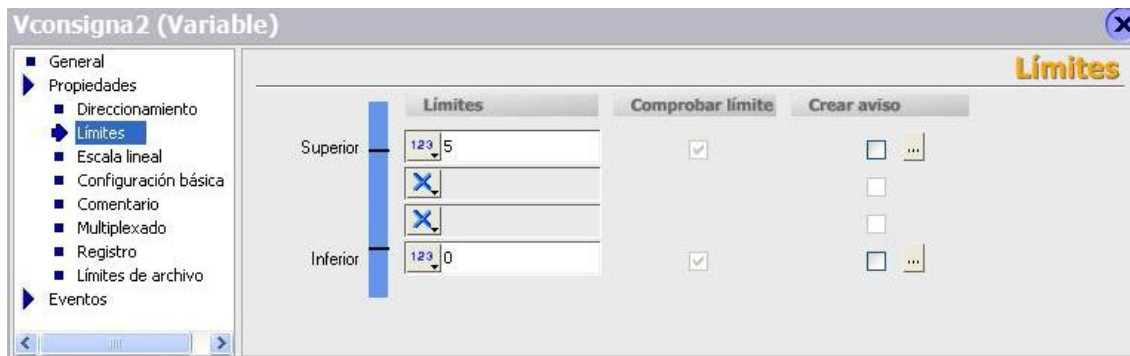


Figura 5.16: Configuración de límites de valor de la variable "Vconsigna2".

La variable “sensor” identifica al valor transformado a dato real (línea de código de la Figura 5.3) de la variable que proviene de la entrada de periferia (Figura 5.2 “PV_PER”). Mediante esta conversión se obtiene un valor dentro del rango 0-65535 de valor hexadecimal, que pese a ser proporcional no está dentro de la escala con que se quiere trabajar. Para solventar esto se realizará un escalado lineal mediante el método de mínimos cuadrados y el valor será almacenado en la variable “sensor_escalado”.

PRESIÓN	sensor
0	76
0,5	1465
1	2763
1,5	4094
2	5592
2,5	6861
3	8283
3,5	9669
4	11048
4,5	12441
5	14000

Tabla 5.2: Valores de sensor para distintas presiones.

El escalado lineal se hará utilizando la ecuación de la recta $y = mx + b$ suponiendo “sensor escalado” (y), “sensor” (x), $b = 0$ y hallando la pendiente de la recta (m) mediante mínimos cuadrados ajustando lo más posible los valores de “sensor” al rango 0-5 bar deseado. Los valores de la variable

“sensor” para los diferentes valores de presión se obtienen experimentalmente, ajustando la presión en el sensor mediante el propio programa desarrollado hasta el momento, y comprobándola con un manómetro analógico.

En la Tabla 5.2 se puede observar una muestra representativa de 11 datos en intervalos de 0,5 bar (realmente se recogió una muestra de 50 datos en intervalos de 0.1 bar para ajustar con una gran precisión la recta). Posteriormente se calculará analíticamente el valor de m mediante mínimos cuadrados, resultando la recta “ajustada” mostrada en la Figura 5.17 que linealiza la muestra “sensor”.

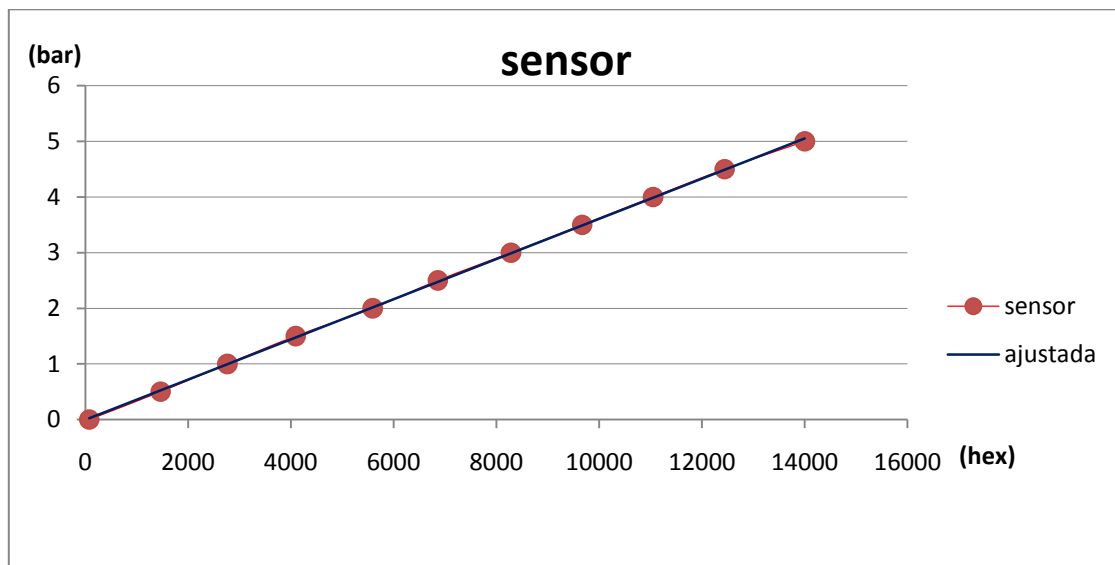


Figura 5.17: Gráfica que muestra la linealización de la variable "sensor".

El valor obtenido para la pendiente de la recta es 0.0362, obteniéndose la ecuación $sensor_escalado = 0.0362 \cdot sensor - 0$ que da lugar a la recta “ajustada” de la Figura 5.17. Dicha variable se configura en la ventana de propiedades de la misma tal y como se ve en la Figura 5.18.

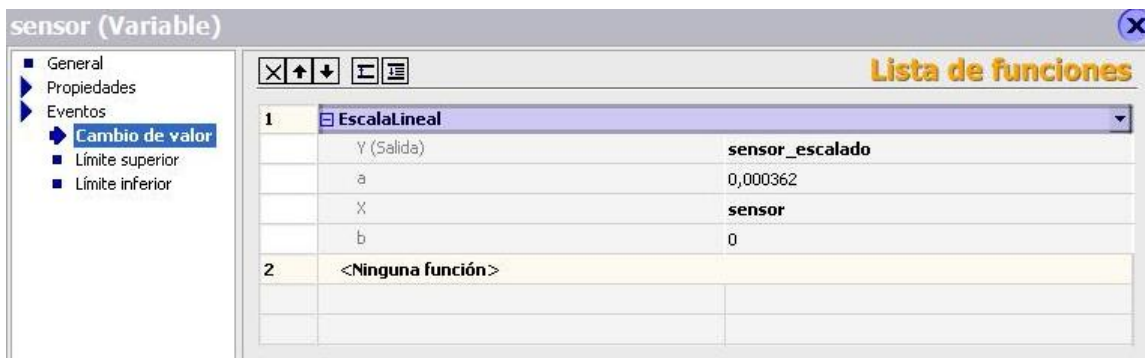


Figura 5.18: Configuración de la linealización de la variable "sensor".

Otra operación matemática asignada a una variable es la de asignar valor 0 a Vconsigna2 al activar la variable RESET. La finalidad de esta configuración es que cuando se ponga a 0 la variable “RESET” se dé el valor 0 a “Vconsigna2” y por tanto a “Vconsigna”. Esta configuración se hace igual que la configuración de escala lineal (Figura 5.15) pero seleccionando la operación “FijarValor”, quedando esta configuración reflejada en la Figura 5.19.



Figura 5.19: Fijar valor "Vconsigna2"=0 al activar la variable "RESET".

El programa permite dar valores iniciales a las variables. Esto permite que cada vez que se ejecute el Runtime no se le dé el valor de 0 o cualquier otro valor, sino el que se necesite o sea aconsejable. Este valor se introduce desde el submenú “Configuración básica” del menú “Propiedades” de la ventana de propiedades, como se puede ver en la Figura 5.20.

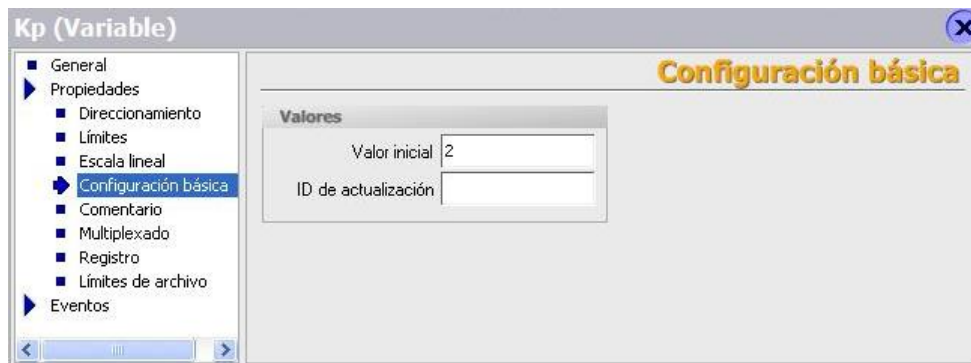


Figura 5.20: Asignación de un valor inicial para las variables.

Una característica importante de las variables en un sistema SCADA es el tipo de adquisición de datos. El programa permite configurar tres modos de adquisición de datos que implican la manera y frecuencia con que el sistema observará cambios actualizando la variable. Los 3 tipos son los siguientes:

- **Sobre demanda:** La variable solo se actualizará por petición de lectura o escritura por parte del sistema.

- **Uso cíclico:** Permite una actualización cíclica durante un evento a una frecuencia definida.
- **Cíclico continuo:** Actualizará las variables de forma continua a una frecuencia determinada. El uso de numerosas variables con modo de adquisición continuo puede provocar una carga importante de datos en las comunicaciones que ralenticen el sistema.

La mayoría de las variables han sido configuradas en modo de adquisición “sobre demanda”, a excepción de las variables que controlan el estado en que se encuentra la válvula proporcional (“ajustado”, “diferente”, “valvula1”, “valvula2”) y la variable de bit “RESET”, configuradas en modo de adquisición “uso cíclico”, y la variable “sensor” establecida con un modo de adquisición “cíclico continuo”. El ciclo de adquisición de todas estas variables es de 100 ms (este valor viene determinado por la capacidad de procesamiento de datos del PLC y no del software) lo que nos permite realizar una visualización que para el ser humano es prácticamente en tiempo real. La configuración de los modos de adquisición y el ciclo de adquisición se realiza desde el menú General de la ventana de propiedades mostrado en la Figura 5.14.

La función de las variables “ajustado”, “diferente”, “valvula1” y “valvula2” se explica más adelante en el capítulo Válvula [proporcional](#) en el punto “Gráficos indicadores de estado de la válvula proporcional”. Mientras que la funcionalidad de las variables “P_Sel”, “I_Sel”, “D_Sel” y “Control_Man” se detalla en el capítulo Control [del regulador PID](#).

5.3.2. Desarrollo de la imagen de proceso

Las imágenes son el elemento principal de un proyecto una vez configuradas serán el interfaz que permita controlar y supervisar el proceso. Para crear una imagen basta con hacer doble clic sobre “Agregar Imagen” en la ventana de proyecto y se creará una imagen con el nombre por defecto Imagen_1. WinCC dispone de objetos como botones, campos de entrada/salida, texto o visualización que permiten configurar la imagen de la forma que el programador crea más conveniente para cada proceso.

La representación de la imagen depende del panel de operador para el que se configure. La representación equivale al aspecto de la interfaz de usuario del panel de operador. Si el panel de operador configurado dispone por ejemplo de teclas de función, éstas se visualizan en la imagen. Otras propiedades, tales como la resolución, las fuentes y los colores disponibles, dependen también del panel de operador configurado. En este caso el panel de

operador elegido es el de un PC estándar con una resolución de 800x600, siendo la Figura 5.21 la imagen inicial sobre la que se va a desarrollar el panel, dispuesta en el área de trabajo.



Figura 5.21: Imagen inicial.

La imagen está configurada jerárquicamente por 32 niveles que van desde el 0 (inferior) hasta el 31 (superior) de tal forma que un elemento de un nivel superior siempre será mostrado sobre otro de nivel inferior. En caso de que quedaran superpuestos dos elementos del mismo nivel también prevalecería uno sobre otro según el orden en que se han creado. Los niveles se pueden mostrar u ocultar a necesidad del programador en el desarrollo de la imagen.

Para introducir nuevos objetos en la imagen basta con seleccionar la pestaña “Objetos básicos” u “Objetos ampliados” en la ventana de herramientas y se visualizará una lista de objetos (Figura 5.22), que una vez configurados apropiadamente permiten crear prácticamente cualquier interfaz que desee el programador.

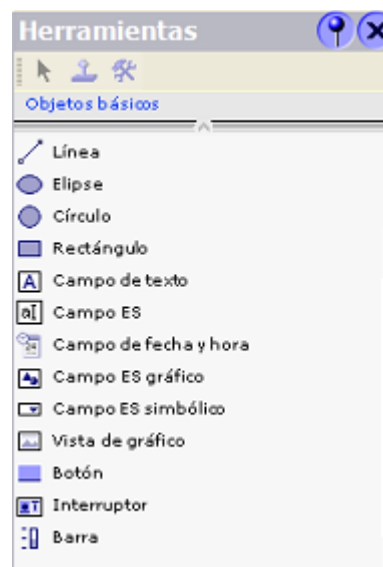














Figura 5.22: Objetos básicos para introducir en la imagen.

A continuación se muestran las tablas Tabla 5.3 y Tabla 5.4 de los objetos básicos y ampliados respectivamente, con el símbolo y una breve descripción de la funcionalidad de cada uno.

Símbolo	Objeto	Funcionalidad
	Línea	Es posible seleccionar líneas con extremos rectos, redondeados o en forma de flecha.
	Línea poligonal	Una línea poligonal consiste de segmentos interconectados, pudiendo tener una cantidad cualquiera de ángulos. Los ángulos se numeran según el orden de su creación. Los ángulos se pueden modificar o borrar individualmente. Para las líneas poligonales se pueden utilizar extremos de líneas rectos, redondeados o en forma de flecha. La línea poligonal es un objeto abierto. Aun cuando el punto inicial tenga las mismas coordenadas que el punto final, la superficie no se podrá rellenar.
	Polígono	Los ángulos de un polígono se numeran según el orden de su creación. Los ángulos se pueden modificar o borrar individualmente. Un polígono se puede rellenar con un color o con un patrón.
	Elipse	Una elipse se puede rellenar con un color o con un patrón.
	Círculo	Un círculo se puede rellenar con un color o con un patrón.
	Rectángulo	Para los ángulos de un rectángulo se puede ajustar un redondeo cualquiera. Un rectángulo se puede rellenar con un color o con un patrón.
	Campo de texto	En un campo de texto se representan textos de una o varias líneas. Al texto se le puede asignar un color y un tipo de fuente. Un campo de texto se puede rellenar con un color o con un patrón.
	Campo ES	Un campo ES puede tener las funciones siguientes en runtime: <ul style="list-style-type: none"> • Salida de valores de una variable. • Entrada de valores por parte del operador. Los valores introducidos se guardan en una variable. • Entrada y salida combinadas. En este caso, el operador podrá editar y cambiar el valor de la variable emitido. Es posible determinar límites para los valores de variables representados en el campo ES. Si la entrada del operador no se debe visualizar en runtime, configure "Entrada oculta".
	Campo de fecha y hora	Un campo de fecha/hora puede tener las funciones siguientes en runtime: <ul style="list-style-type: none"> • Indicación de hora y fecha • Introducción y emisión combinadas. En este caso, el operador podrá editar los valores emitidos y cambiar así la fecha o la hora. Como fuente de la fecha y hora puede indicar la fecha del sistema, o bien una variable correspondiente.
	Campo ES gráfico	Un campo ES gráfico puede tener las funciones siguientes en runtime: <ul style="list-style-type: none"> • Salida de las entradas de una lista de gráficos • Introducción y emisión combinadas. En este caso, el operador podrá seleccionar un gráfico de una lista de gráficos y modificar así el contenido del campo de E/S gráfico.
	Campo ES simbólico	Un campo ES simbólico puede tener las funciones siguientes en runtime: <ul style="list-style-type: none"> • Salida de las entradas de una lista de texto • Entrada y salida combinadas. En este caso, el operador puede seleccionar un texto de una lista de textos y modificar así el contenido del campo ES simbólico.
	Vista de gráfico	La vista de gráficos permite visualizar en una imagen gráficos creados con programas externos. Es posible visualizar gráficos de los formatos siguientes: "*.emf", "*.wmf", "*.dib", "*.bmp", "*.jpg", "*.jpeg", "*.gif" y "*.tif". Los
















		gráficos creados con programas externos también se pueden insertar en la vista de gráficos en calidad de objetos OLE (Object Linking and Embedding). Los objetos OLE se pueden abrir y editar en el programa en el que hayan sido creados directamente desde la ventana de propiedades de la vista de gráficos.
	Botón	El operador puede controlar un proceso mediante un botón. En el botón de comando se configuran funciones o scripts.
	Interruptor	En runtime, un interruptor sirve para introducir y visualizar dos estados, por ejemplo ON y OFF, o bien "pulsado" y "soltado". El interruptor se puede rotular con un texto o gráfico para visualizar en runtime el estado del mismo.
	Barra	Una barra sirve para representar en runtime un valor del autómatas en forma de una columna dotada con una escala. En una barra se pueden visualizar por ejemplo los diferentes niveles de llenado.

Tabla 5.3: Objetos básicos.

Símbolo	Objeto	Funcionalidad
	Deslizador	Utilizando un deslizador, el operador puede leer e introducir valores de la manera siguiente: <ul style="list-style-type: none"> La posición del deslizador indica un valor actual del autómatas. Para introducir valores, el operador desplaza el deslizador hasta la posición indicada. El deslizador sólo se puede configurar en sentido de desplazamiento vertical.
	Reloj	El reloj permite visualizar la hora del sistema en runtime, bien sea de forma analógica o digital.
	Estado/forzar	Utilizando el objeto "Estado/forzar", el operador puede leer o escribir directamente áreas de direcciones individuales del autómatas SIMATIC S7 o SIMATIC S5 conectado.
	Vista Sm@rtClient	Utilizando la vista Sm@rtClient, el operador puede manejar y visualizar otro panel de operador de la instalación.
	Navegador HTML	El operador puede utilizar el navegador HTML para visualizar páginas HTML.
	Vista de usuario	El manejo de objetos de imagen se puede proteger en WinCC flexible mediante contraseñas. En la vista de usuarios, un administrador puede gestionar en runtime los usuarios en el panel de operador. Un usuario sin derechos de administrador puede modificar su contraseña en runtime utilizando la vista de usuarios.
	Indicador	El indicador sirve para visualizar valores numéricos en runtime. El aspecto del indicador se puede configurar. Por ejemplo, es posible modificar el gráfico de fondo o el diseño de la escala.
	Visualización de curvas	La visualización de curvas permite visualizar simultáneamente varias curvas en las que se representen los valores del autómatas o de un fichero. Los ejes de la visualización de curvas se pueden configurar (escalas, unidades, etc.).
	Vista de recetas	En runtime, el operador puede visualizar, editar y gestionar registros en la vista de recetas.
	Vista de avisos	En la vista de avisos, el operador puede visualizar en runtime avisos o eventos de avisos seleccionados del búfer o del fichero de avisos.
	Ventana de avisos	En la ventana de avisos, el operador puede visualizar en runtime avisos o eventos de avisos seleccionados del búfer o del fichero de avisos. La ventana de avisos sólo se puede configurar en la plantilla.
	Indicador de avisos	El indicador de avisos le comunica al operador que han aparecido avisos pendientes de acuse que no se han acusado todavía. El indicador de avisos sólo se puede configurar en la plantilla.


	<p>Indicador de ayuda</p>	<p>Gracias al indicador de ayuda, el operador reconoce que existen textos de ayuda acerca de la imagen abierta, o bien para los objetos que contiene. El indicador de ayuda está disponible en los paneles de operador OP 73 y OP 73micro. El indicador de ayuda sólo se puede configurar en la plantilla.</p>
---	---------------------------	--

Tabla 5.4: Objetos ampliados.

Mediante esta imagen se pretende crear un interfaz que permita controlar la presión acumulada en el depósito y que ésta se muestre además de numéricamente y con un indicador estilo analógico, de una manera gráfica fácilmente entendible. Por otra parte se pretende dotar al proyecto de una función didáctica. Para ello se aprovechará la posibilidad de poder modificar las acciones PID para que un posible usuario pueda comprobar los efectos reales de cada una de estas acciones en una aplicación real mediante un gráfico que muestre la evolución en el tiempo de la presión deseada y la real. Además, se creará un bloque que pueda describir el comportamiento de la válvula proporcional.

A continuación en la Figura 5.23 se muestra un aspecto general de la pantalla del panel de operador que se va a desarrollar.

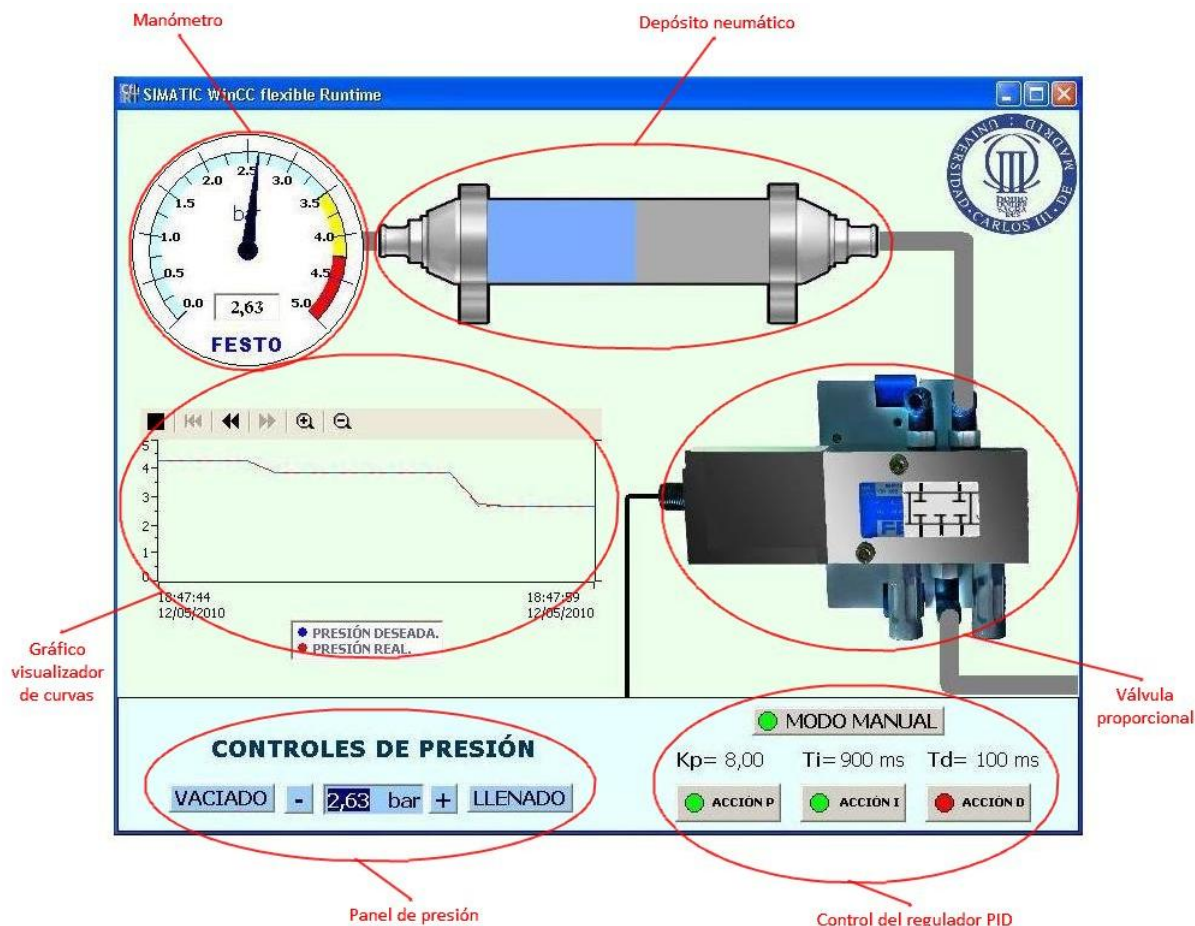


Figura 5.23: Aspecto general del panel de operador.

Para poder explicar de una forma más estructurada cómo se configuró la imagen, este capítulo se desglosará en conjuntos de objetos que compondrán los elementos más importantes.

5.3.2.a. Indicador manométrico

Se compone por dos objetos: un manómetro y un display superpuesto.

- **Manómetro:**

La estética que se le ha querido dar al manómetro es una aproximación al que se conectó en el sistema neumático (Figura 3.11) pero adecuándolo al funcionamiento real del sistema. Con este manómetro se pretende mostrar el valor real de la presión en modo analógico leyendo la variable “sensor_escalado”.

Desde los objetos ampliados de la ventana de herramientas, pulsar sobre indicador (Tabla 5.4). El indicador introducido vendrá configurado por defecto. Las modificaciones que habrá que realizar en la ventana de propiedades son las siguientes:

- En el menú “General” introducir los valores de “FESTO” como título, “bar” como unidad, “sensor_escalado” como variable y marcar la opción “Mostrar decimales”, quedando la configuración mostrada a continuación en la Figura 5.24.

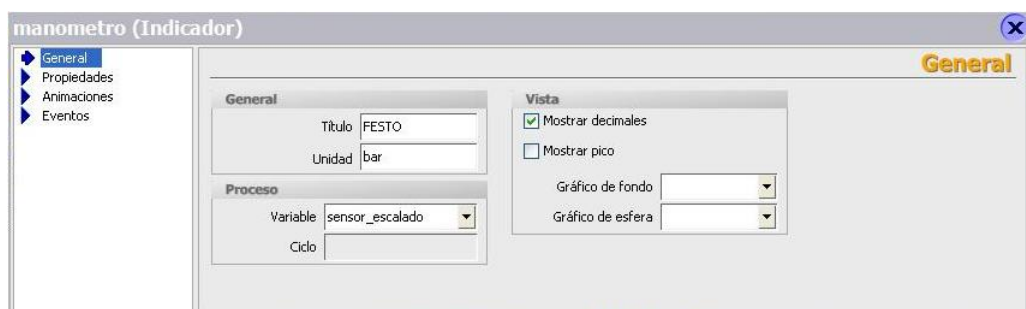


Figura 5.24: Configuración General del manómetro.

- En el submenú “Representación” de “Propiedades” se establece la posición en coordenadas en la imagen, su tamaño y otros parámetros que se pueden ver en la Figura 5.25.

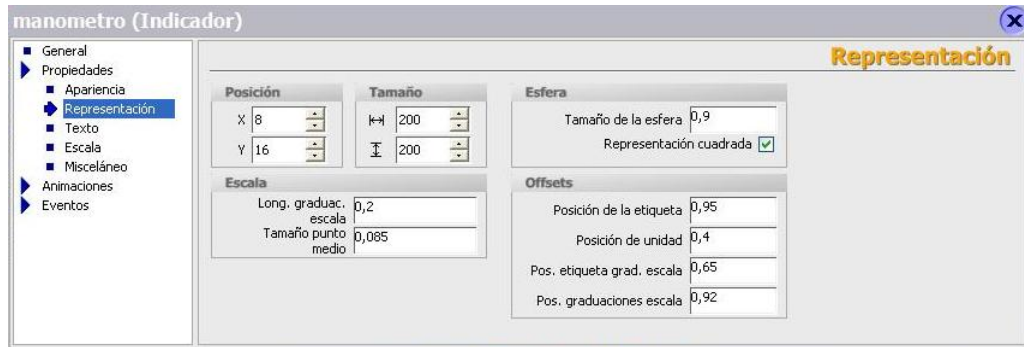


Figura 5.25: Configuración de la Representación del indicador manómetro.

- Por último, en el submenú “Escala” se introducen los valores del rango de escala (0 a 5 bar), los intervalos que se mostrarán en la graduación (0,5 bar), y el inicio del área de advertencia así como de peligro (3,5 y 4,25 bares respectivamente).

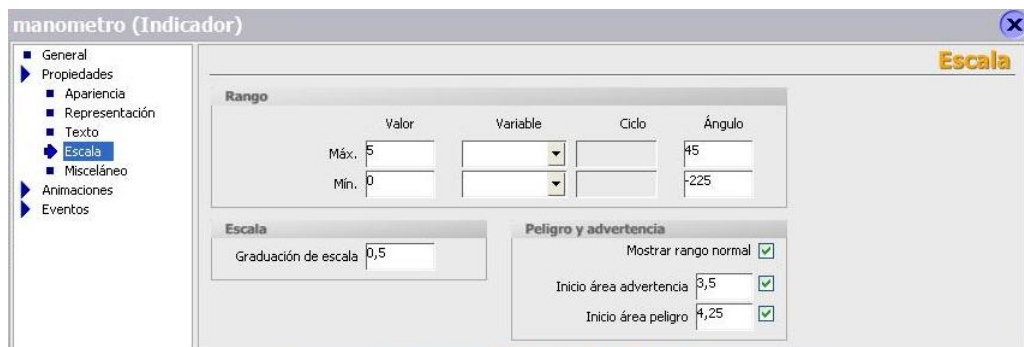


Figura 5.26: Configuración de la escala del manómetro.

Además de la representación del indicador analógico, tan frecuentemente usado en los sistemas neumáticos, se le quiso proporcionar un indicador digital que nos diese una lectura decimal más aproximada, por lo que se le incluyó un display cuya configuración se muestra en el siguiente punto.

• Display:

Este elemento se creó a partir del objeto básico “Campo ES” (Tabla 5.3), y se configuró con los parámetros descritos seguidamente en la Figura 5.27 en el menú “General” de la ventana de herramientas. El tipo de modo del campo es “Salida”, ya que este campo es solo de lectura y no de escritura, es decir, se usará para mostrar un valor y no permite que se introduzca ninguno. La variable de proceso es la misma que para el indicador “sensor_escalado” (se mostrará el mismo valor pero esta vez en formato digital). La representación del valor será decimal y en formato

99,99, lo que significa que permite mostrar un valor entero menor a la centena y con hasta dos decimales.

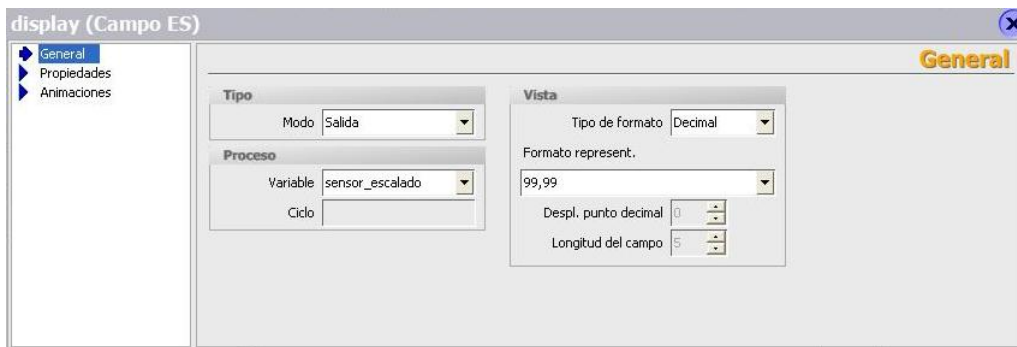


Figura 5.27: Configuración general del display del manómetro.

5.3.2.b. Depósito neumático

La idea de incluir una vista del depósito busca, como se ha explicado anteriormente, representar de manera gráfica la presión además de numéricamente. Esto es solo una interpretación de cómo el aire llenaría el depósito (que sería un modelo real del volumen de fluido en un sistema hidráulico), ya que el aire al ser compresible se expande.

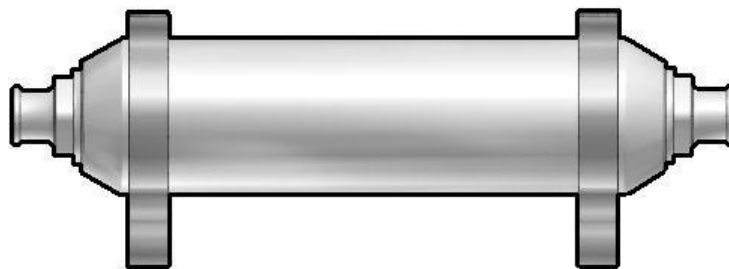


Figura 5.28: Imagen representativa del depósito neumático.

Para llevar esta representación a WinCC se ha introducido un gráfico que recrea el depósito con una barra dimensionada de manera apropiada en su interior. Su desarrollo se explica a continuación:

- **Gráfico del depósito:**

La imagen introducida recreando el depósito es la mostrada en la Figura 5.28. Este elemento se introduce desde los objetos básicos seleccionando “Vista de gráfico”, que permite introducir algunos formatos de imagen existentes en el PC. Solo es necesario seleccionar el archivo de imagen en el menú general de la ventana de propiedades del gráfico tal y

como se muestra a continuación en la Figura 5.29, pulsar sobre “Establecer” y posteriormente dimensionarla como se desee.

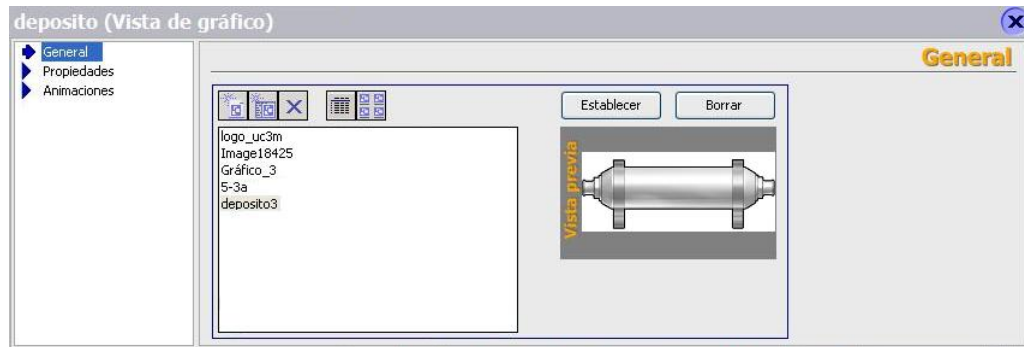


Figura 5.29: Configuración general del gráfico del depósito.

- **Barra del depósito:**

Se trata del elemento tipo “Barra” de los objetos básicos (Tabla 5.3). Esta barra representa nuevamente el valor de “sensor_escalado” en forma de barra horizontal y ha sido dimensionada y colocada sobre el depósito dando la sensación de estar en el interior del mismo. Se configuran sus valores máximo y mínimo en el menú “General” de la ventana de propiedades como se muestra en la Figura 5.30. En el submenú “Apariencia” del menú de “Propiedades” se ha seleccionado el color de la barra en color azulado y como color de fondo un gris semejante al color del gráfico del depósito.

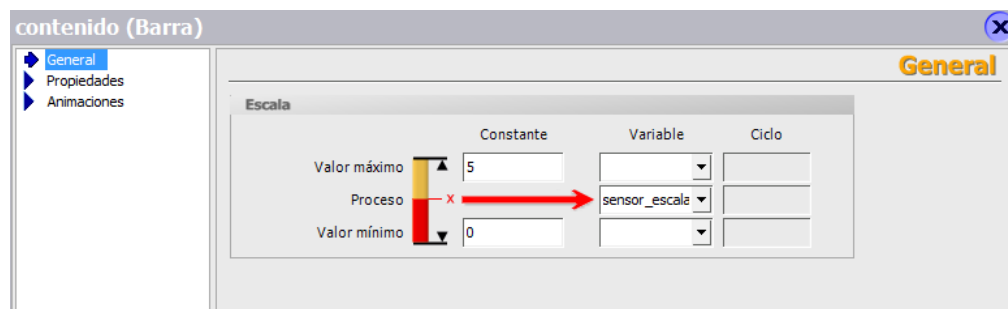


Figura 5.30: Configuración de la barra del depósito.

5.3.2.c. Válvula proporcional

Este elemento, al igual que ocurre con el control del regulador PID, no formaba parte del objetivo inicial del proyecto pero según se profundizó en su desarrollo se pensó que daría mayor funcionalidad al mismo.

Se compone de 4 gráficos, uno de ellos que representa la imagen de la válvula proporcional y los otros 3 que se utilizan para indicar la posición en que se encuentra en cada momento la válvula.

- **Gráfico de la válvula proporcional:**

Este elemento es una foto que se utilizará como marco de los objetos que indican el estado de la válvula. Se trata de una foto de la válvula proporcional utilizada que se muestra a continuación en la Figura 5.31.

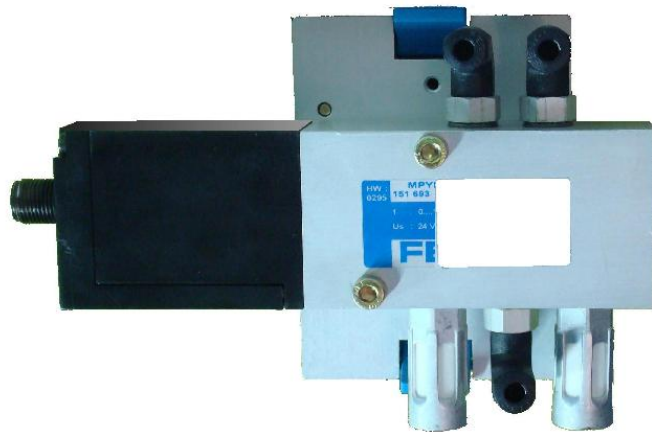


Figura 5.31: Gráfico de la válvula proporcional.

Este gráfico se introduce en el panel de operador de la misma forma que el gráfico del depósito, desde la venta de propiedades de gráfico, añadir el archivo, pulsar sobre “Establecer” y dimensionarlo.

- **Gráficos indicadores de estado de la válvula proporcional:**

Cada uno de los tres gráficos representa mediante esquema neumático una de las posiciones de la válvula proporcional 5/3.

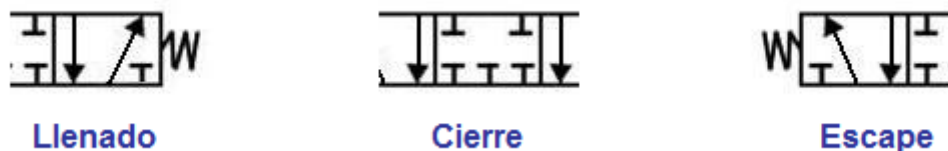


Figura 5.32: Gráficos indicadores de estado de la válvula proporcional.

Estos gráficos se encuentran posicionados en la misma parte del panel de operador superpuesto el de escape sobre el de llenado, y el de cierre sobre el de escape. Esto se consigue dándoles diferentes niveles en

la imagen. En este caso se dio a llenado y escape el nivel 1 estableciendo superioridad jerárquica al símbolo de escape (la jerarquía establecida para un nivel es el orden en que se ha creado cada objeto), y nivel 2 para el símbolo de cierre. Todos ellos quedarán ocultos en parte por el gráfico de la válvula proporcional establecida en el nivel 4.

El funcionamiento que se pretende que siga es que cada símbolo solamente se muestre cuando se active la variable correspondiente. El símbolo de llenado está asociado a la variable “valvula1”, el de vaciado a “valvula2” y el de cierre a la variable “ajustado”. Como se explicó anteriormente, estas variables se activan siguiendo una lógica programada paralelamente en Step7 (Figura 5.5).

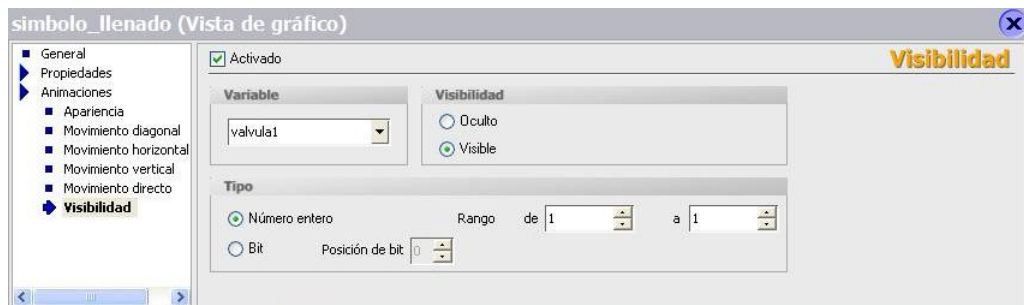


Figura 5.33: Configuración de la visibilidad del símbolo de llenado.

Esta configuración se realiza igual para los tres símbolos usando la variable apropiada para cada una. Se inserta un gráfico desde los objetos básicos se selecciona el archivo de imagen correspondiente y en esa misma ventana de propiedades en el submenú “Visibilidad” dentro del menú “Animaciones” se selecciona “Activado”, la variable correspondiente, número entero (1) y Visibilidad “Visible” de tal forma que sea visible cuando la variable tenga el valor de 1. Esta configuración se puede observar en la Figura 5.33.

5.3.2.d. Gráfico representativo de las presiones en función del tiempo

La utilidad de este gráfico es esencial para ver como el PID regula la presión del acumulador neumático respecto a la que se desea en función del tiempo.

Las variables que representa son la presión deseada en azul y la presión real en rojo, “Vconsigna2” y “sensor_escalado” respectivamente.

Este elemento se introduce desde los objetos ampliados, escogiendo “Visualización de curvas” (Tabla 5.4). En la ventana de propiedades, en el submenú “Curva” de Propiedades se seleccionan las variables que se van a mostrar, el tipo de línea, el color y el tipo de curva (Tiempo real cíclico), esto queda más claro observando la Figura 5.34.

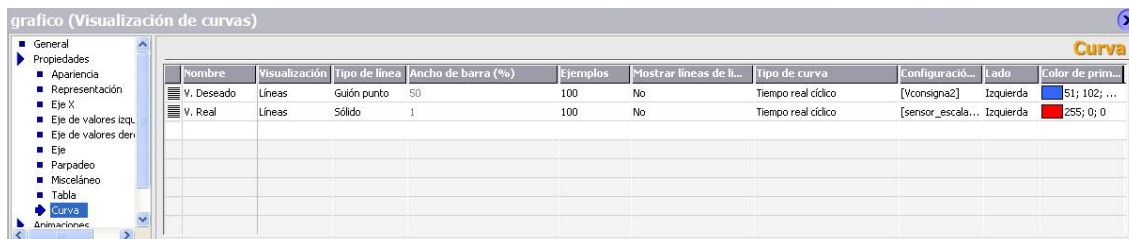


Figura 5.34: Configuración de las curvas del visualizador.

Además, desde el menú “General” mostrado en la Figura 5.35 se introduce la barra de herramientas (que permite retroceder, pausar y avanzar la gráfica en el tiempo, pudiéndose por ejemplo observar eventos ocurridos hace 3 minutos mientras no se estaba observando el panel de operador) y se permite realizar las operaciones proporcionadas por la barra de herramienta del teclado (permite por ejemplo retroceder en el tiempo pulsando la tecla ←).

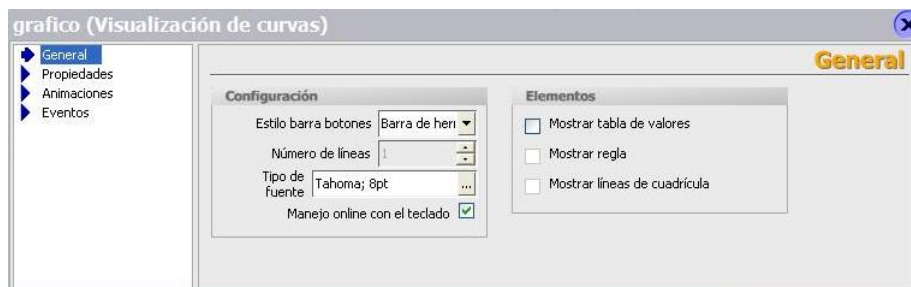


Figura 5.35: Configuración general del visualizador de curvas.

Acompañando a este objeto se incluyó una leyenda que identifica a cada uno de los dos elementos que se representan en el visualizador de curvas. La leyenda se creó a partir de un “Campo de texto” y dos “Círculos”. Esta leyenda se muestra a continuación en la Figura 5.36.



Figura 5.36: Leyenda del visualizador de curvas.

5.3.2.e. Control del regulador PID

El control del regulador PID permite activar, desactivar y configurar individualmente los parámetros de cada una de las tres acciones del regulador PID. En la Figura 5.37 se muestra una imagen de su aspecto general.



Figura 5.37: Aspecto del control del regulador PID.

Los elementos que componen el control del regulador PID son 3 botones que activan o desactivan las acciones PID, 3 campos entrada salida que permiten configurar los parámetros Kp, Ti y Td y un último botón que sirve para activar o desactivar el modo manual. Seguidamente se explica cómo crear y configurar estos elementos.

- **Botones de las acciones PID.**

Es necesario un botón por cada acción PID. La configuración de los tres botones es exactamente la misma diferenciándose solamente en la variable sobre la que actúan. Por tanto, se explicará como configurar el botón de la acción P y sólo será necesario aplicar estos pasos modificando la variable.

Al igual que los botones anteriores, estos se incluyen desde los objetos básicos. Su función en términos de programación es la de cada vez que se pulse cambie el estado de una determinada variable. Esto se consigue de la forma mostrada en la Figura 5.38.

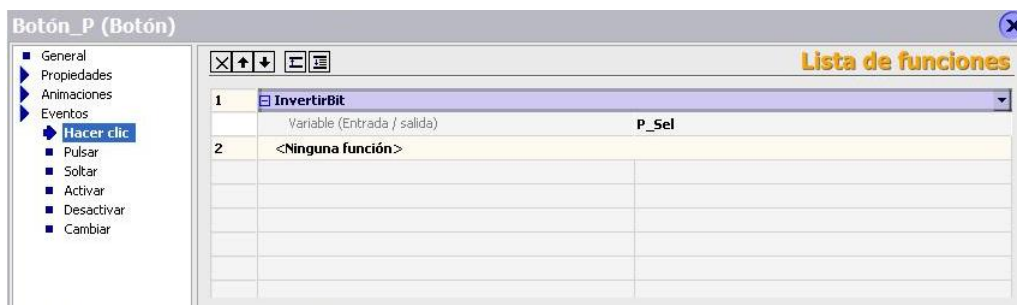


Figura 5.38: Configuración de los botones de las acciones PID.

Como se puede ver, aparte de configurar el botón en tamaño, color, texto y demás detalles ya explicados anteriormente, simplemente hay que configurar en el submenú “Hacer clic” del menú “Eventos” la opción “InvertirBir” e indicar la variable, en este caso “P_Sel” que se corresponde con la dirección de memoria “M182.1”, q permite en el bloque FB41 (Figura 5.2) que el regulador permita o no la acción P según sea el valor de esta dirección verdadero o falso.

Para la acción I habría que sustituir la variable “P_Sel” por “I_Sel” que se corresponde con la dirección “M182.2”, mientras que la acción D debe ser reemplazada por la variable “D_Sel”, relacionada con la dirección “M182.3”.

Además, cada uno de estos botones lleva insertado un piloto que indicará el estado de la acción, verde cuando esté activada (la variable correspondiente tenga valor 1) y rojo mientras esté desactivada (la variable correspondiente tenga valor 0).

Estos pilotos se insertan desde los objetos básicos como “Círculo”. Tras dimensionarlos y posicionarlos desde el menú “Propiedades” de la ventana de propiedades se configura en el submenú “Apariencia” del menú “Animaciones” seleccionando la variable correspondiente a cada botón (P_Sel, I_Sel o D_Sel) , en tipo “Número entero” y en “Valor” se añaden 0 y 1, mientras que en “Color de fondo” se seleccionan rojo y verde respectivamente, quedando la ventana con la apariencia mostrada en la Figura 5.39.

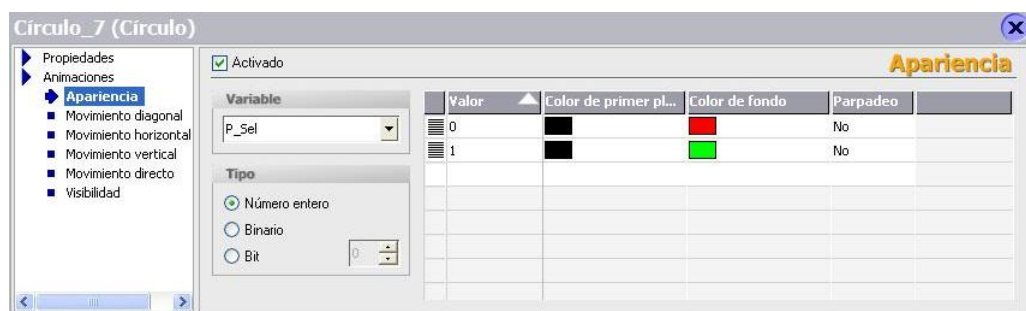


Figura 5.39: Configuración del indicador de color para los botones de las acciones PID.

• Parámetros del PID:

Con los botones activamos y desactivamos las acciones PID. Sin embargo, una vez activadas estas acciones el regulador actuará de una forma u otra según el valor que se introduzca en estos campos.

Al igual que ocurría con la configuración de los botones de cada acción, la configuración de cada campo es exactamente igual para cada parámetro, a diferencia de la variable y el formato de representación. A continuación se explica la configuración del parámetro “Kp”.

Se introduce un “Campo ES” desde los objetos básicos. Una vez posicionado, se configura desde la ventana de propiedades, seleccionando en el menú “General” modo “Entrada/Salida” (ya que mostrará y permitirá que se introduzcan valores), variable “Kp”, tipo de formato “Decimal” y formato de representación 99,99 (dos decimales, unidades y decenas). Esta configuración se puede ver en la Figura 5.40. En los parámetros Ti y Td habría que seleccionar como variables “Ti” y “Td”, respectivamente, y el formato de representación para estos parámetros serían 999 (unidades, decenas y centenas sin decimales), ya que por sus características no es necesario que tengan decimales debido a que el valor utilizado es del orden de milisegundos y no es necesaria más precisión.



Figura 5.40: Configuración General de los campos ES para los parámetros PID.

Para que el valor escrito se introduzca en la variable hay que realizar el proceso de configuración en el submenú “Activar” de “Eventos” seleccionando la variable (Kp, Ti y Td) y el valor. En el valor vendrá por defecto el nombre correspondiente a cada campo, en este caso “Campo ES_3” para Kp.

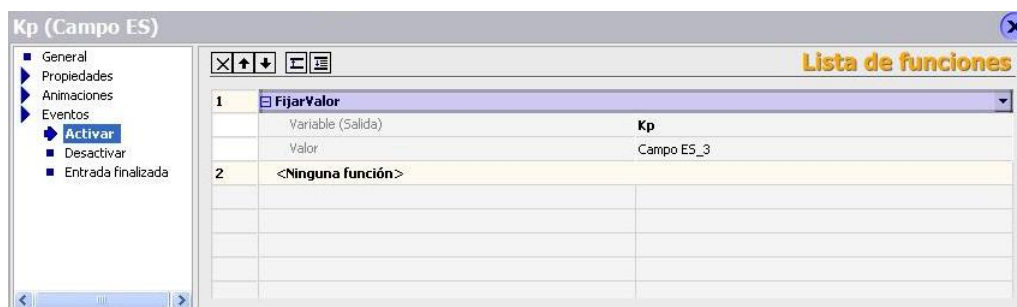


Figura 5.41: Configuración del Evento de los campos ES para los parámetros PID.

Estos elementos se completan añadiendo campos de texto del mismo tamaño indicando cual es cada parámetro y en el caso de los parámetros Ti y Td las unidades (milisegundos).

- **Botón del modo manual:**

Los reguladores pueden funcionar en modo manual (lazo abierto) o en modo automático (lazo cerrado). En modo automático el regulador estará funcionando en lazo cerrado, calculando en todo momento el valor que se debe proporcionar en la salida del regulador, mientras que en modo manual el regulador estará funcionando en lazo abierto, e introducirá directamente un valor predefinido que mantendrá continuamente sin ninguna variación y sin realizar ningún cálculo, por tanto se puede decir que no estaría controlando si no asignando un valor forzado a la salida. Esta función es útil cuando se ha introducido una mala configuración en el sistema y este se encuentra descontrolado. También puede ser útil para que el sistema este funcionando en lazo abierto mientras se revisan fugas en el circuito neumático.

Mediante este botón se activará o desactivará esta opción. Su configuración es la misma que la de los botones de las acciones PID sustituyendo la variable correspondiente por “Control_Man” asociada a M182.0 (Figura 5.2) y agregándole dos funciones nuevas como son la de “ActivarBit” Reset (para asegurar que el regulador no se reinicia mientras se ejecuta el modo manual) y “FijarValor” para la variable “Vconsigna2” con el valor “2,5”(de esta forma al volver al modo automático el sistema se establecerá en una presión media, no obstante este valor no tiene trascendencia y puede ser modificado). La configuración resultante se muestra en la Figura 5.42.

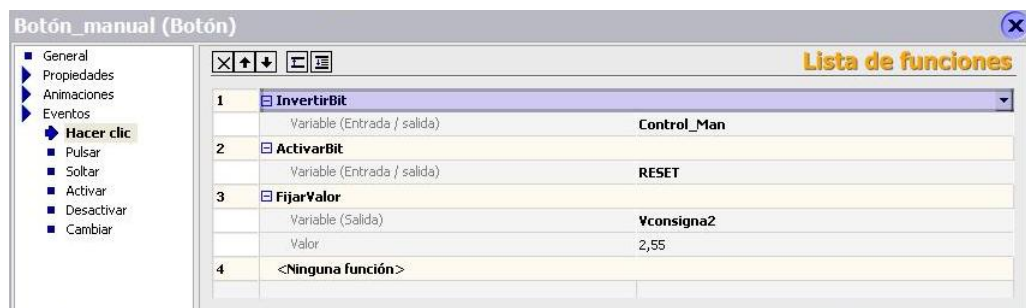


Figura 5.42: Configuración al hacer clic del botón de modo manual.

La configuración del indicador de color de activado/desactivado es nuevamente la misma que en los anteriores botones (Figura 5.39), a

diferencia de la variable que será “Control_Man”, por lo que no se entra más en detalle.

Cuando se activa el modo manual al no poder regular el usuario la presión se avisa a este mediante un cartel informativo explicando el modo en que se encuentra y como configurar los parámetros del regulador PID. Este cartel ocultará toda la zona de los controles de presión y mostrará la expresión de cálculo del PID parpadeando sobre la misma.

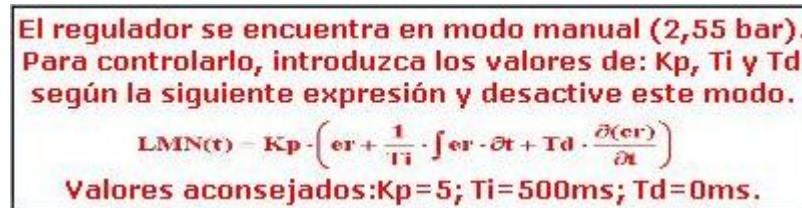


Figura 5.43: Cartel informativo del modo manual.

La configuración para la “Visibilidad” se realiza seleccionando en el submenú “Visibilidad” la opción “Activado”, como variable “Control_Man”. En el apartado “Visibilidad” se seleccionará “Oculto” y en el rango de 1 a 1 de número entero. De esta forma este cartel y sus complementos se ocultarán cuando la variable “Control_Man” valga 0. Esto se muestra en la Figura 5.44.

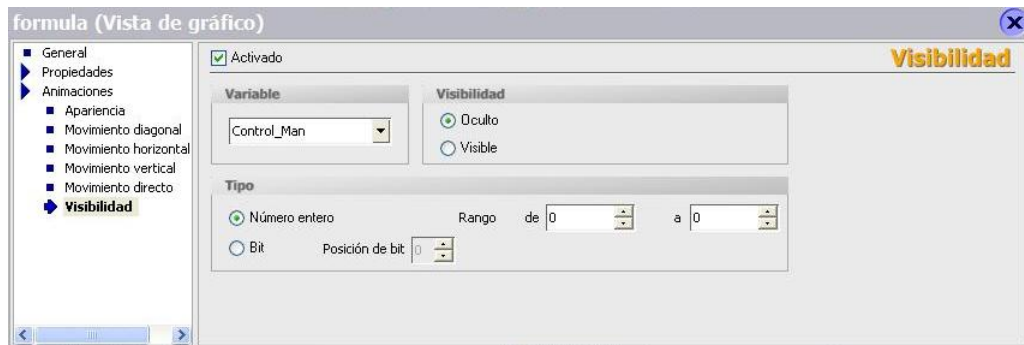


Figura 5.44: Configuración de la visibilidad del cartel informativo de control manual.

Como se ha comentado sobre la expresión matemática del cálculo del PID se superpone una igual con los colores invertidos parpadeando que pretende llamar la atención del usuario. La imagen se muestra en la Figura 5.45, y la configuración para conseguir que parpadee se realiza desde el submenú “Parpadeo” del menú “Propiedades”, seleccionando “Estándar”. Se muestra un detalle de su ventana de propiedades a continuación en la Figura 5.46.

$$LMN(t) = K_p \cdot \left(e_r + \frac{1}{T_i} \cdot \int e_r \cdot dt + T_d \cdot \frac{\partial(e_r)}{\partial t} \right)$$

Figura 5.45: Aspecto de la expresión matemática del regulador PID mostrada.

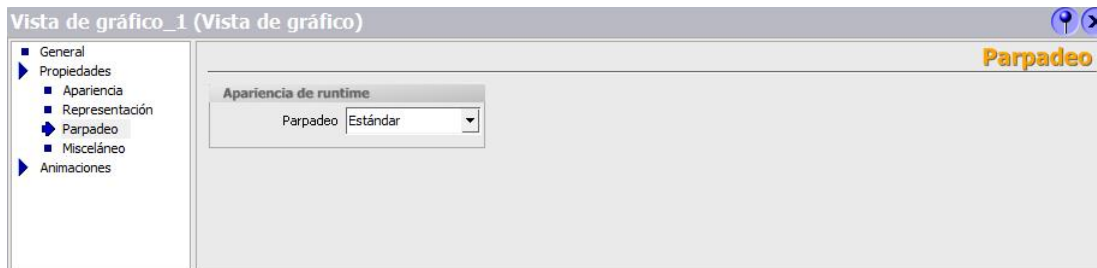


Figura 5.46: Configuración del parpadeo de la expresión matemática del regulador PID mostrada.

5.3.2.f. Panel de presión

Se puede observar en la Figura 5.47 que los controles de presión lo componen cuatro botones, un campo E/S que actúa como display y un campo de texto a modo de título. Los controles de presión se encuentran ubicados en la parte inferior de la imagen compartiendo un área con el control del regulador PID. Esta área se encuentra diferenciada del resto del panel de operador al estar limitada por un rectángulo creado a partir de los objetos básicos.



Figura 5.47: Aspecto de los controles de presión.

El programa permitirá controlar la presión siempre que el control manual del regulador PID esté desactivado, es decir, el valor de su variable sea 0. En cambio, cuando se active el control manual y el valor de la variable "Control_Man" pase a ser 1, los objetos controladores de presión se desactivarán y desaparecerán del panel, además aparecerá un mensaje de aviso en el lugar que ocupan los controles de presión. Para desactivar y ocultar ha sido necesario en todos estos elementos realizar la siguiente configuración en el menú "Apariencia":

- En el submenú "Activar Objeto" seleccionar la opción "Activado", como variable "Control_Man". En el apartado "Visibilidad" pulsar sobre

desactivado, y en el tipo elegir número entero en rango 1 a 1, quedando la ventana de configuración como la de la Figura 5.48.

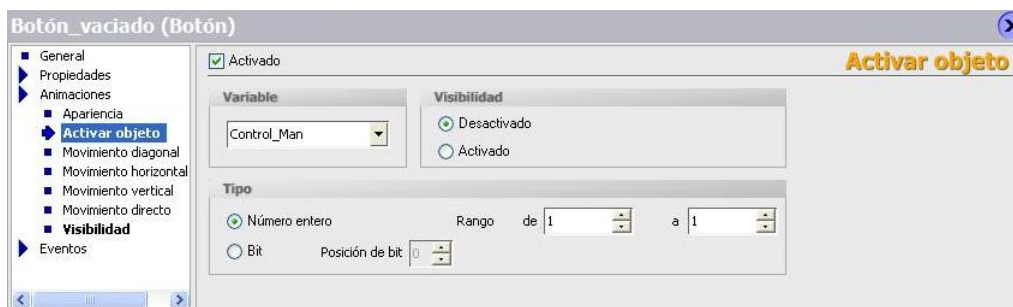


Figura 5.48: Configuración para desactivar los controles de presión.

○ En el submenú “Visibilidad” se procederá de manera similar a diferencia del apartado “Visibilidad” en el que las opciones son “Oculto” o “Visible” siendo la primera la que habrá que pulsar.



Figura 5.49: Configuración para ocultar los controles de presión.

A continuación se explica la función concreta y la configuración de cada uno de los elementos que conforma el control de presión:

- **Botones del panel de presión:**

Lo componen cuatro botones denominados vaciado, botón –, botón + y llenado. Estos cuatro elementos se introducen desde los objetos básicos pulsando sobre “botón” (Tabla 5.3), su texto se introduce desde el menú “General” de la ventana de propiedades. Seguidamente se explicarán sus funciones específicas y su configuración.

El botón de vaciado tiene como su propio nombre indica la misión de vaciar el acumulador. La forma en que realizará esta acción es mediante la variable “RESET”, desactivándola al pulsar (Figura 5.50), de tal forma que reinicia el regulador PID (asociado a la variable M160.0 que se puede ver en la Figura 5.2) y le da el valor 0 a la variable “Vconsigna2”. Una vez

soltado el botón (Figura 5.51), se vuelve a activar la variable “RESET”, pero el valor de “Vconsigna2” permanecerá a 0.

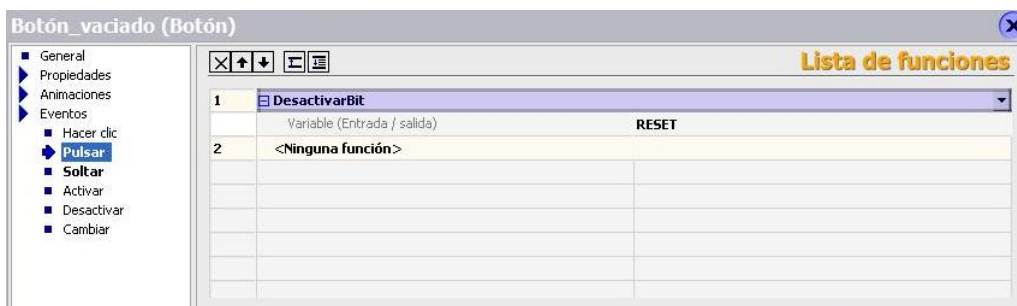


Figura 5.50: Configuración al pulsar el botón de vaciado.

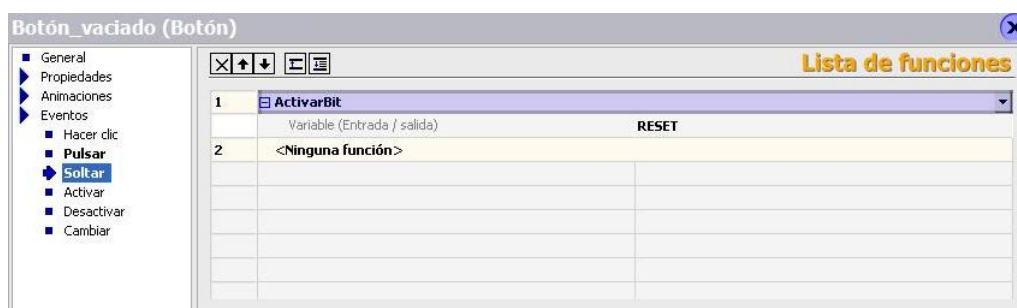


Figura 5.51: Configuración al soltar el botón de vaciado.

El botón – y el botón + realizan la función de reducir y aumentar respectivamente el valor de la variable “Vconsigna2” en intervalos de 0,25. Su configuración es prácticamente la misma, en la ventana de propiedades en el submenú “Hacer clic” del menú “Eventos” se selecciona en el menú desplegable la opción “Reducir valor” o “Aumentar valor”, en la variable se selecciona “Vconsigna2” ya que es la variable en la cual queremos modificar el valor, y en el campo valor se escribirá 0,25. Esta configuración se puede ver a continuación en la Figura 5.52.

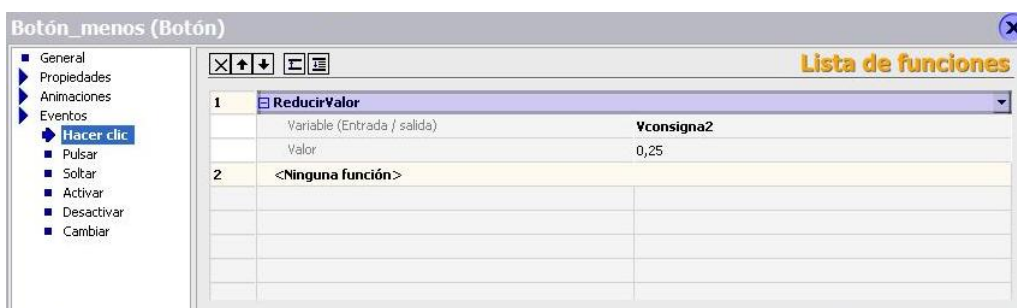


Figura 5.52: Configuración del Evento al hacer clic en botón –.

El botón de llenado, al contrario que ocurre con el botón de vaciado, establece la presión en un valor de 4,25 (es un valor sin trascendencia que se ha establecido un 85% de la presión máxima). El procedimiento que sigue es similar al de los botones – y +, pero al hacer clic, la acción que realizará será la de fijar valor de “Vconsigna2” en 4,25 (esta acción se selecciona en el mismo menú desplegable).

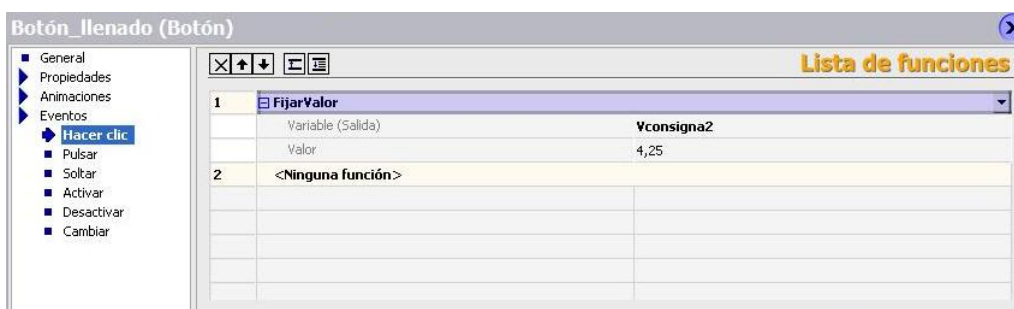


Figura 5.53: Configuración del Evento al hacer clic en el botón de llenado.

- **Display para asignar y mostrar el valor de la presión.**

La función de este elemento es permitir que el usuario introduzca el valor de presión que desee con hasta 2 decimales. Este elemento es del mismo tipo que el explicado anteriormente como display del manómetro, a diferencia de que el anterior estaba configurado como un campo solo de salida (Figura 5.27) y este es de entrada y salida.

Tras incluir el campo ES desde los objetos básicos, la configuración a realizar en este caso es, en el menú “General”, establecer modo “Entrada/Salida” en lugar de solo “Entrada”, como variable “Vconsigna2” ya que es la variable que da valor a la presión. La configuración de vista del campo es la misma que la anterior.



Figura 5.54: Configuración General del Display de control de presión.

Para que el programa escriba el valor que escribamos en el campo se deberá ir al menú “Eventos” y en el submenú “Entrada finalizada” seleccionar “FijarValor” y en los campos de Variable (Salida) y Valor elegir “Vconsigna2” y “CampoES_1” (que es el nombre que tiene este campo dentro del programa) respectivamente, de esta forma se asociará el valor introducido a la variable una vez escrito y pulsado intro.

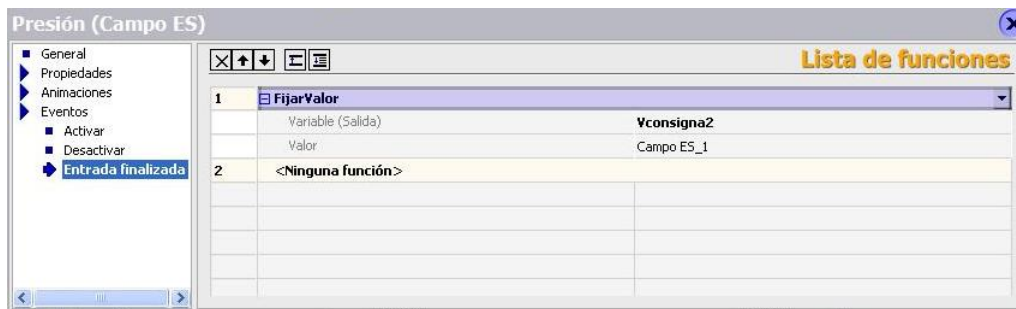


Figura 5.55: Configuración de eventos del Display de control de presión.

Este campo de entrada/salida además va acompañado de un campo de texto con el mero fin de indicar las unidades “bar”, como se puede ver en la Figura 5.47.

- **Título del panel de presión.**

Su función es simplemente la de indicar los controles de presión. Se ha introducido mediante un campo de texto de los objetos básicos de la misma forma que se introdujo la leyenda de la vista de curvas.

5.3.2.g. Tuberías y escape de aire

Mediante estos elementos se pretende simular el comportamiento del aire mediante flechas en cada momento sobre la parte del circuito neumático representada en el panel de operador (se muestran en la Figura 5.56).

El procedimiento seguido en la configuración es el mismo que en las posiciones de la válvula proporcional (Figura 5.33) ya que la circulación del fluido viene determinada por el comportamiento de la misma, siendo en dirección hacia el depósito cuando se encuentra activa la variable “valvula1”, en dirección hacia el escape cuando se activa la variable “valvula2” y no mostrándose ninguna dirección cuando la válvula está cerrada. Por tanto la configuración de llenado (flechas en dirección al depósito) se realiza tal y como se muestra en la Figura 5.33, mientras que

para las flechas de vaciado (flechas en sentido del depósito a la válvula) y las flechas que representan el escape se sustituye en la configuración la variable “valvula1” por “valvula2”. Las flechas que van a la entrada de la válvula se muestran continuamente parpadeando ya que en este sentido siempre está llegando fluido.

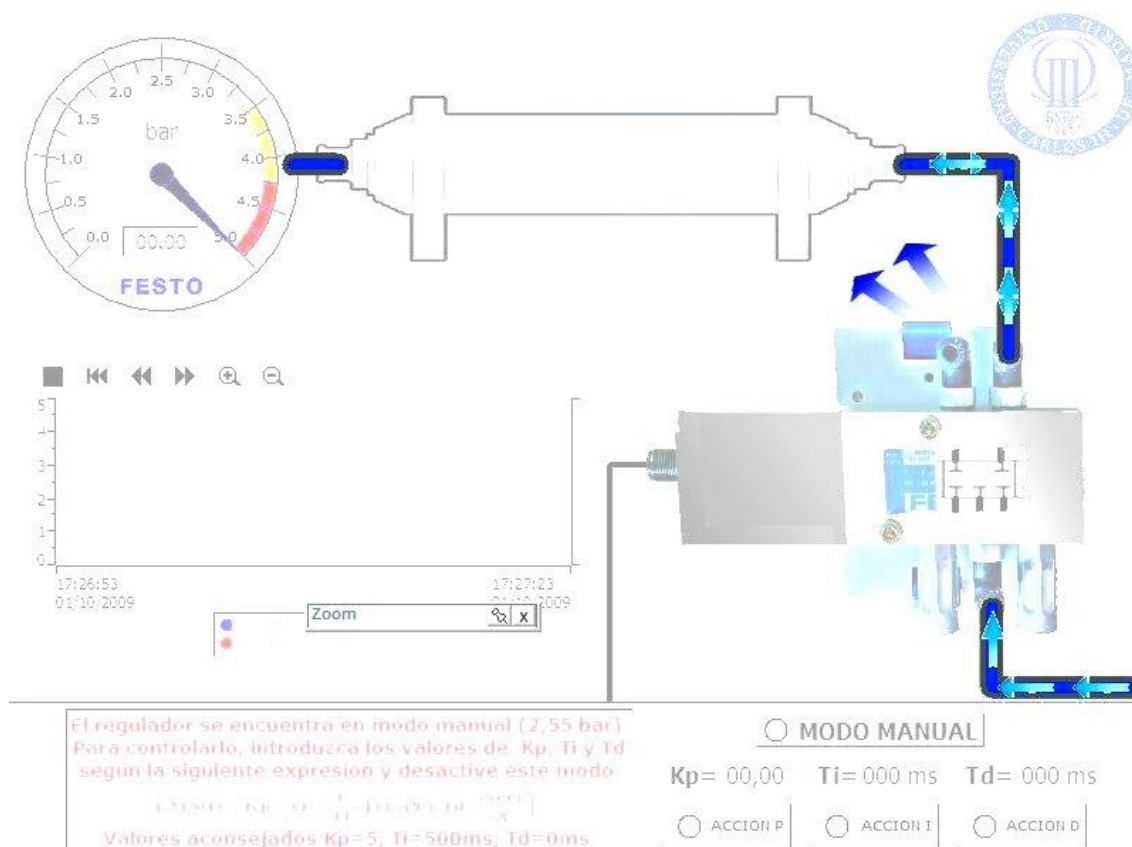


Figura 5.56: Tuberías y escape del circuito neumático.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Introducción

En este capítulo se muestra un análisis de las capacidades del sistema HMI desarrollado, las reacciones del sistema ante las posibles situaciones a las que pueda ser sometido por parte del usuario y su respuesta ante ellas. Se muestran unas pruebas finales que demuestran que el sistema es capaz de funcionar correctamente en todo momento.

A continuación se muestra el comportamiento del sistema ante una serie de situaciones. El modo manual no tiene mayor interés puesto que lo que hace es forzar un valor determinado en la salida del regulador que no se verá alterada en ningún momento. Por tanto, se pasará este modo por alto y se comenzará analizando cómo afectan las diferentes configuraciones del regulador PID. Posteriormente se realizará una serie de comprobaciones sobre la manera en que el sistema actúa ante los cambios de presión.

6.2. Regulación PID

Todos los controles del regulador PID se encuentran agrupados en la parte inferior derecha del panel de operador tal y como se observa en la Figura 5.23 y es aquí donde el usuario puede configurar según sus necesidades los parámetros del regulador.

Teóricamente el sistema ideal para controlar la presión de un proceso con un fluido gaseoso es un regulador P con un valor moderadamente grande de ganancia, ya que la variación de la presión es un proceso muy estable y se elimina prácticamente el error con la acción proporcional.

Utilizando un regulador P con un valor de constante proporcional bajo se obtienen resultados con un error demasiado alto que se ve reducido a medida que se aumenta este parámetro. No obstante, pese a comprobar que el error es prácticamente 0 con una constante proporcional del orden de 50 (Figura 6.2), se observan fluctuaciones en el régimen permanente del sistema, tal y como se observa en la Figura 6.1.

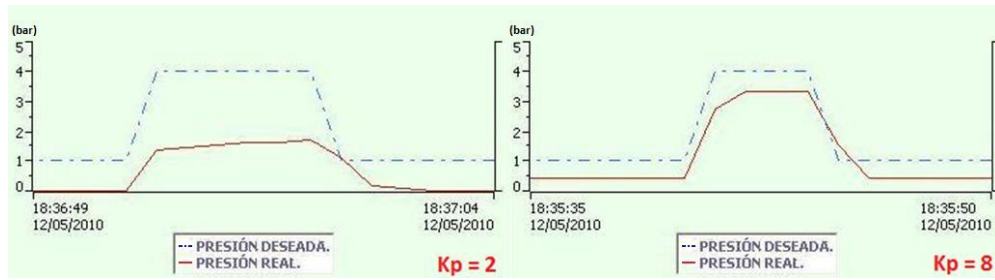


Figura 6.1: Comportamiento con regulador P con $K_p=2$ y $K_p=8$.

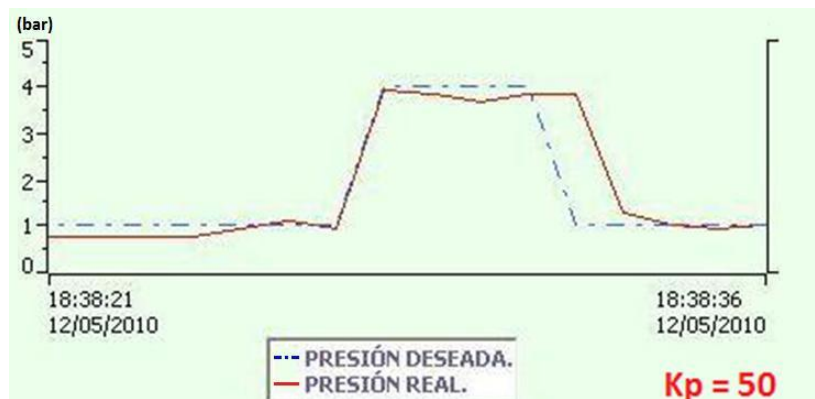


Figura 6.2: Comportamiento del sistema con un regulador P y $K_p=50$

Tras esta observación se comprobó que el proceso mejoraba notablemente reduciendo la constante proporcional e introduciendo además una acción integral. Si el valor de integración era demasiado pequeño, esta acción no ejercía ninguna variación. Además, si el valor de la constante proporcional se mantenía en un valor alto, el tiempo de reacción del regulador era demasiado grande. En la Figura 6.3 se puede comparar el comportamiento con un regulador P ($K_p = 18$) y el comportamiento de este mismo regulador añadiéndole una acción integral ($T_i = 900$ ms).

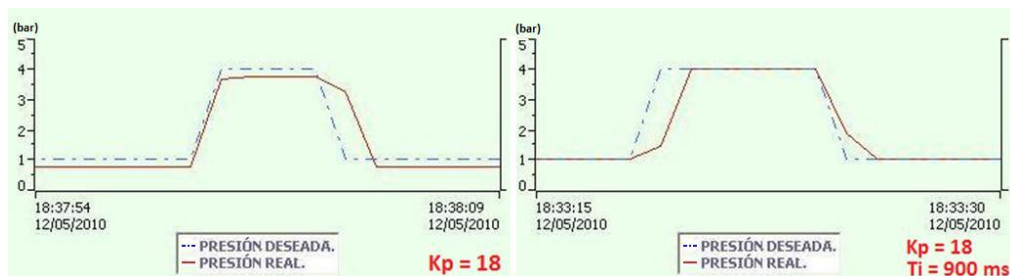


Figura 6.3: Comparación del comportamiento del sistema con un regulador P y con un regulador PI.

Experimentalmente se comprobó un excelente comportamiento del sistema con reguladores PI con $K_p = 8$ y $T_i = 900$ ms, que respondía rápidamente ante los

cambios y no producía ninguna oscilación en el sistema. Se observa un gráfico del comportamiento del sistema en estas condiciones en la Figura 6.4.

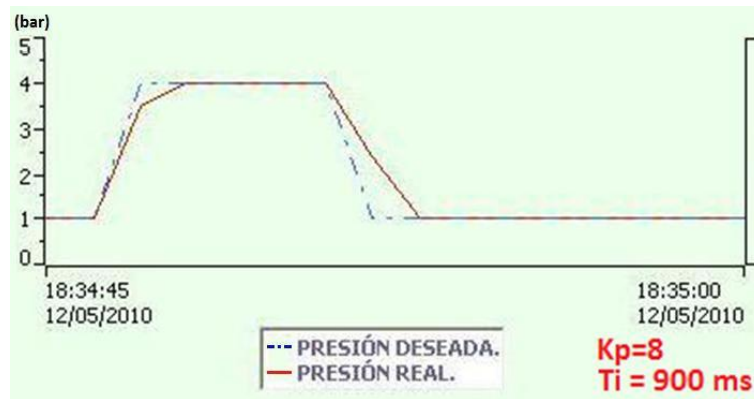


Figura 6.4: Comportamiento del sistema con un regulador PI con $K_p = 8$ y $T_i = 900$ ms.

Finalmente, se analizó cómo respondía el sistema añadiéndole la acción derivativa, no obteniéndose ninguna mejora utilizando un regulador PID, incluso dando un alto valor de tiempo derivativo y observándose que introducía oscilaciones en régimen permanente (mayores a medida que se aumentaba el tiempo derivativo). Esto se puede ver en la Figura 6.5.

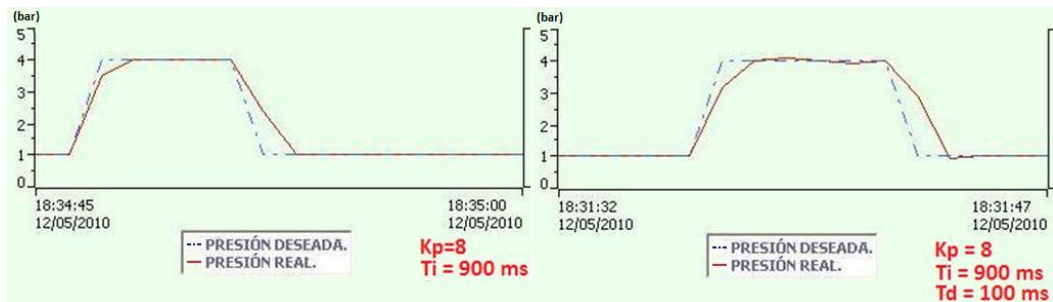


Figura 6.5: Comportamiento del sistema con un regulado PD y un PID.

6.3. Respuesta ante cambios de presión

En este punto se analizará cómo responde el sistema ante unos cambios de presión con una determinada configuración de los parámetros PID que nos dará una idea de cómo actuará el sistema ante cualquier situación a la que se pueda ver inducido por el usuario. En este caso la configuración utilizada es mediante un regulador PI con $K_p = 8$ y $T_i = 900$ ms, que en el punto anterior se consideró que daba como resultado una buena respuesta en la regulación.

Los controles de presión se encuentran agrupados en la parte inferior izquierda del panel de operador como se mostró en la Figura 5.23.

6.3.1. Comportamiento exacto

En primer lugar, se demostrará cómo el sistema es capaz de mantener cualquier presión con un error máximo de $\pm 0,01$ bar. Para ello, se mostrará el comportamiento ante un valor muy bajo (0,03 bar), un valor medio (2,63 bar) y un valor muy alto de presión (4,99 bar).

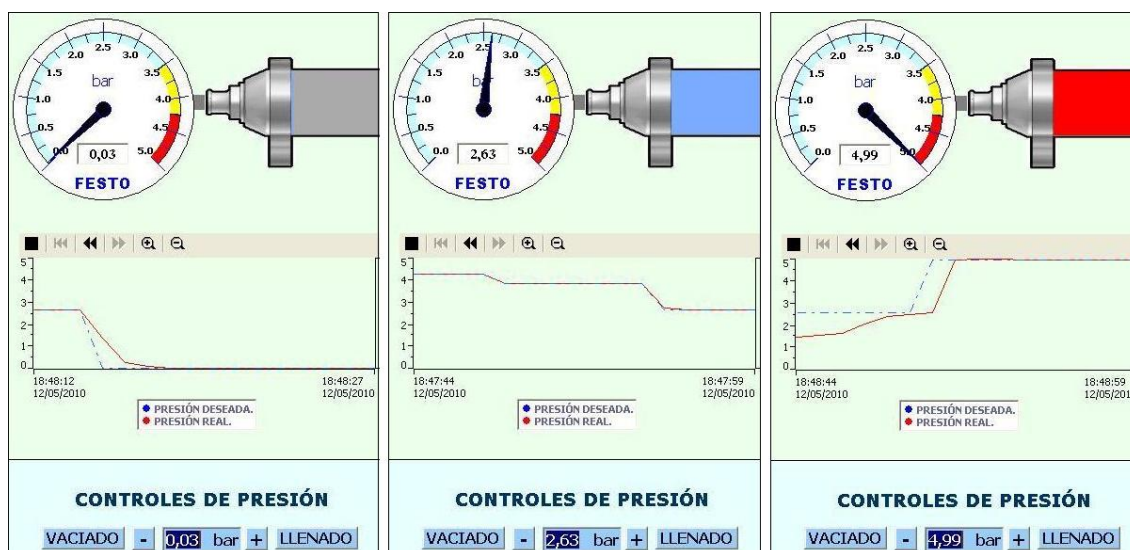


Figura 6.6: Comportamiento exacto del sistema.

Como se puede observar en las gráficas de los paneles de operador mostrados en la Figura 6.6, el sistema se ajusta rápidamente al valor introducido por el usuario sin que se produzcan oscilaciones.

6.3.2. Área de advertencia, de peligro y alcance de valor máximo

Seguidamente se mostrará cómo el sistema indica correctamente el paso a la presión umbral de las áreas de advertencia en la Figura 6.7 y de peligro en la Figura 6.8 (3,5 y 4,25 bar, respectivamente) y al alcanzar el límite superior del área de peligro en la Figura 6.9 (5 bar).

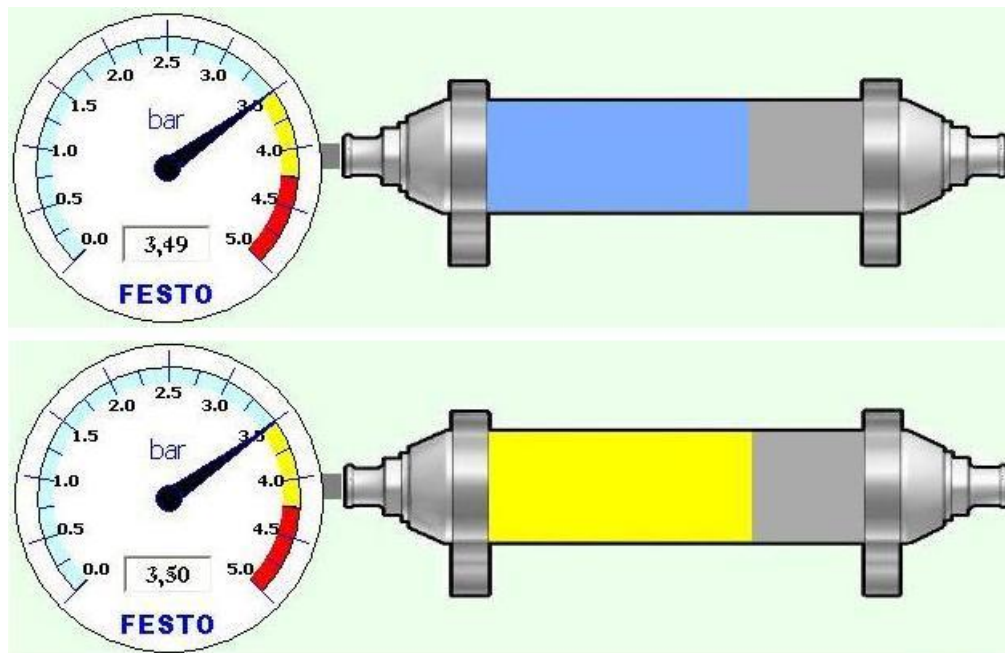


Figura 6.7: Paso de área normal a área de advertencia (3,49 a 3,5 bar).

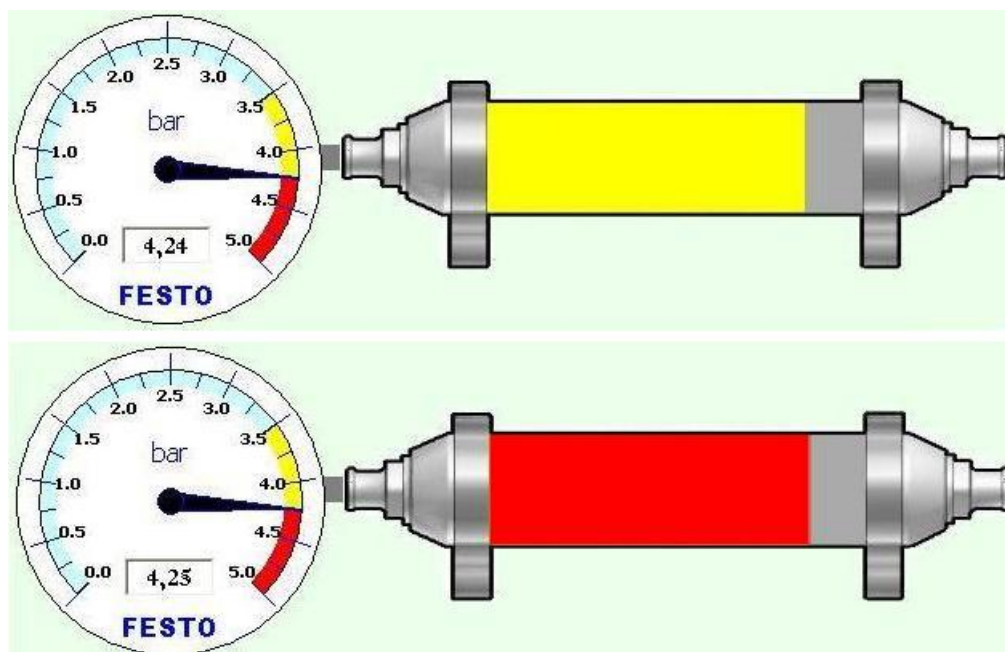


Figura 6.8: Paso del área de advertencia al área de peligro (4,24 a 4,25 bar)

En la Figura 6.9 se muestra el comportamiento al alcanzar el límite superior del área de peligro (5 bar).

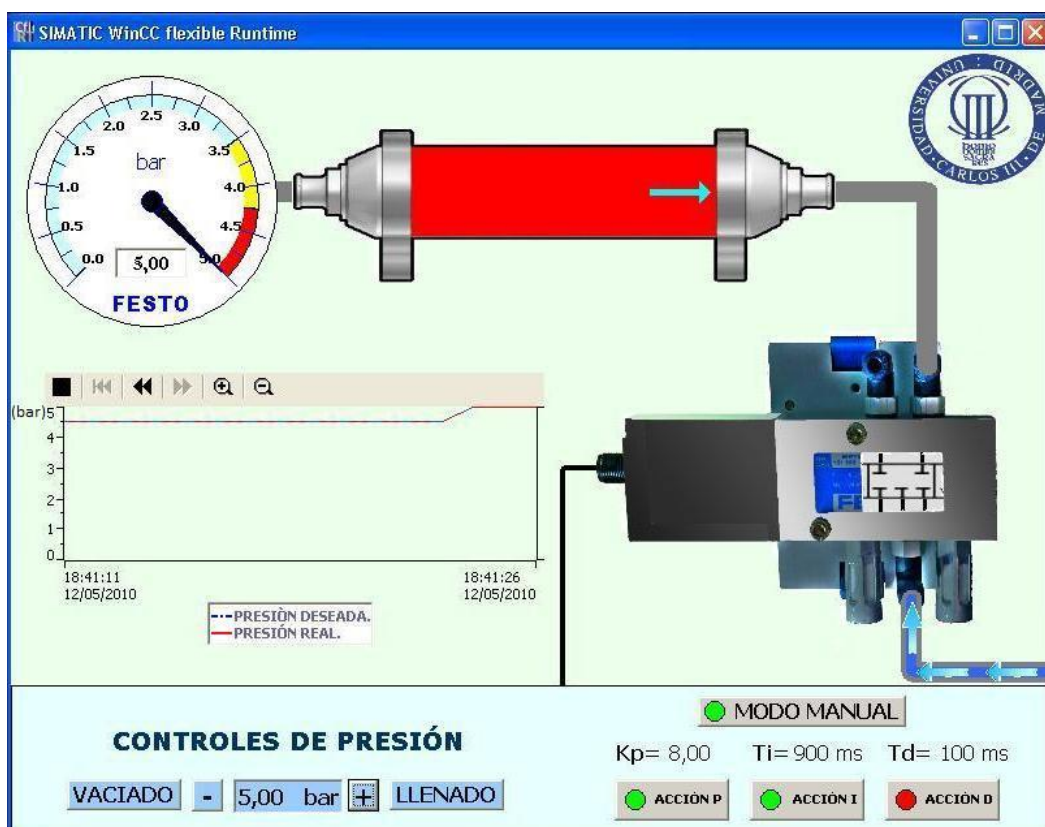


Figura 6.9: Aspecto del panel cuando se alcanza el máximo de presión.

6.3.3. Comportamiento en llenado y vaciado del sistema

En este punto se muestra cómo en el proceso de llenado y vaciado se alcanza la presión deseada tras un corto periodo de respuesta por parte del sistema.

En la imagen mostrada en la Figura 6.10 se puede ver cómo la posición de la válvula se encuentra en llenado y la dirección de las flechas de los tubos van en dirección al depósito simulando el recorrido del flujo de aire.

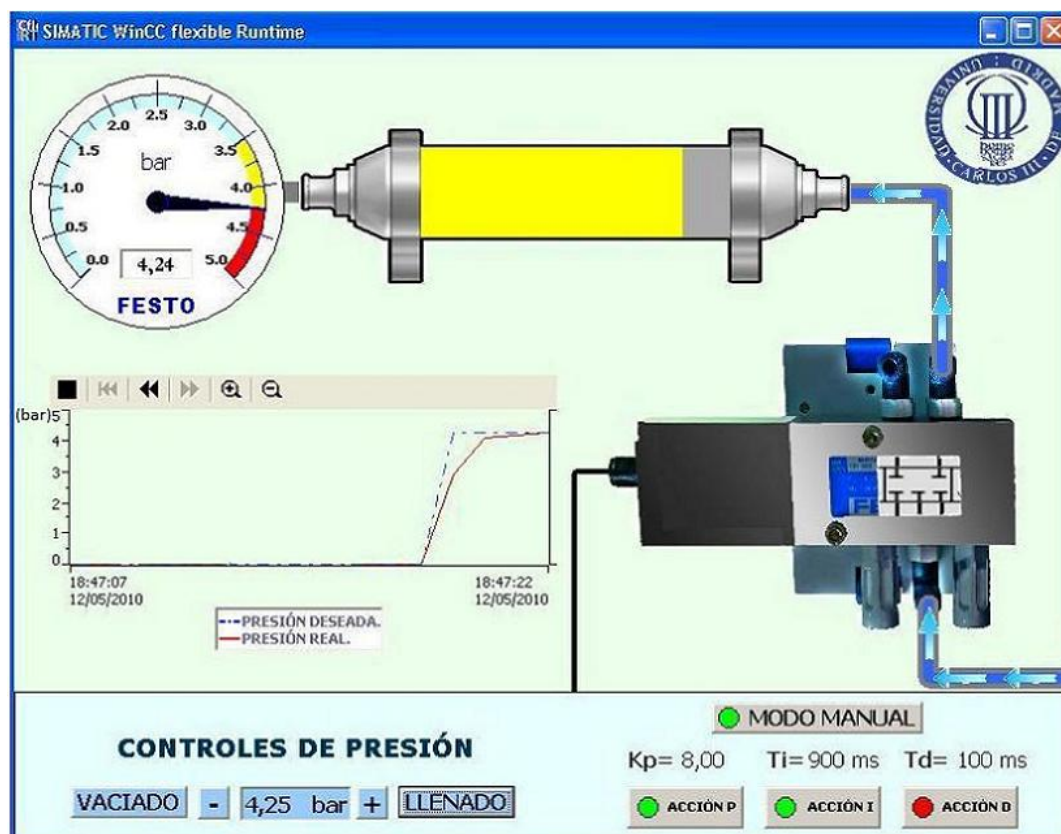


Figura 6.10: Comportamiento en el llenado.

De la misma forma, en la Figura 6.11 se puede comprobar cómo en el vaciado la posición de la válvula es la correspondiente a este estado, la dirección de las flechas del tubo es contraria al depósito y además aparecen las flechas indicando el escape del aire.

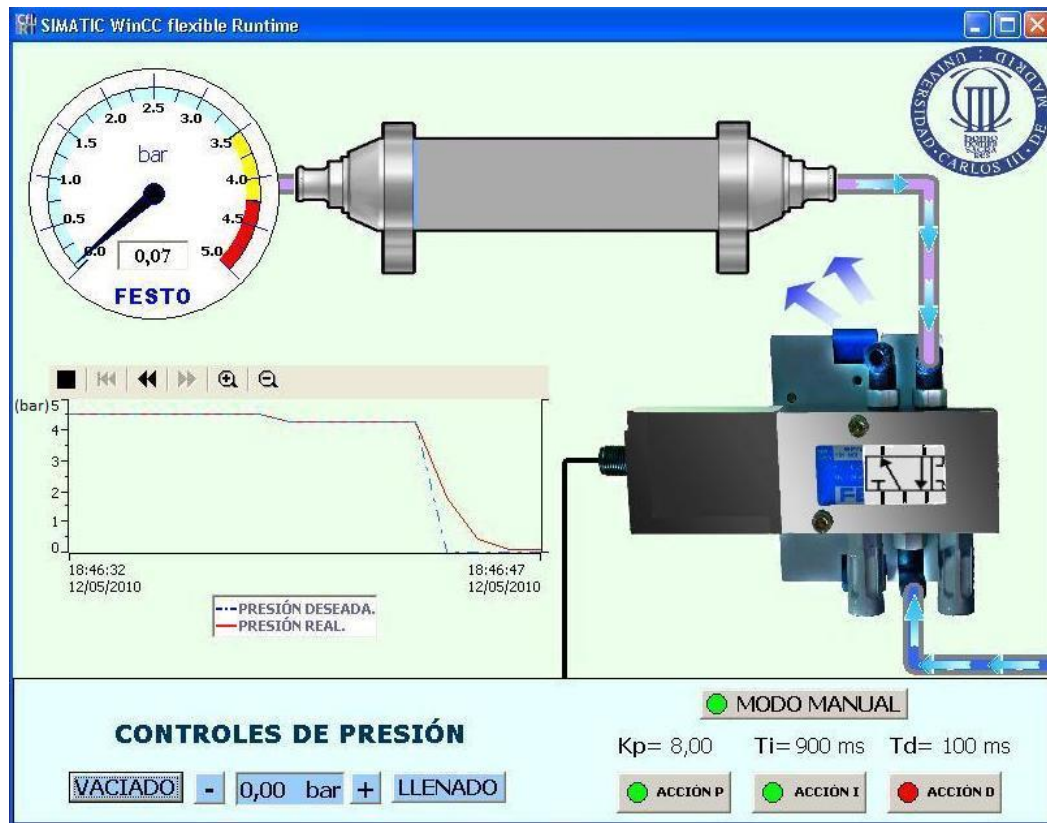


Figura 6.11: Comportamiento en el vaciado.

6.3.4. Comportamiento dinámico del sistema

El regulador debe ser capaz de controlar con un reducido tiempo de reacción cualquier variación en la presión. Para ello, se va a someter al sistema a pequeños aumentos de presión en intervalos de 0,25 bar para ver cómo se comporta el regulador.

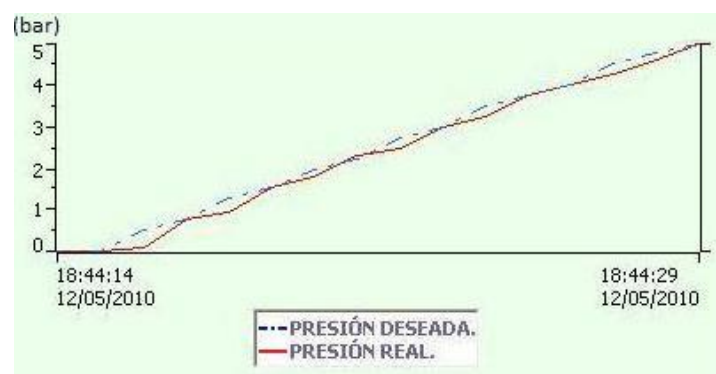


Figura 6.12: Comportamiento en el aumento de presión en escalones.

Se puede observar cómo realizando 20 variaciones en la presión en intervalos de menos de 1 segundo el sistema ha sido capaz de ir adaptándose a estos cambios.

A continuación se realizará el mismo proceso pero esta vez se analizará el comportamiento disminuyendo la presión.

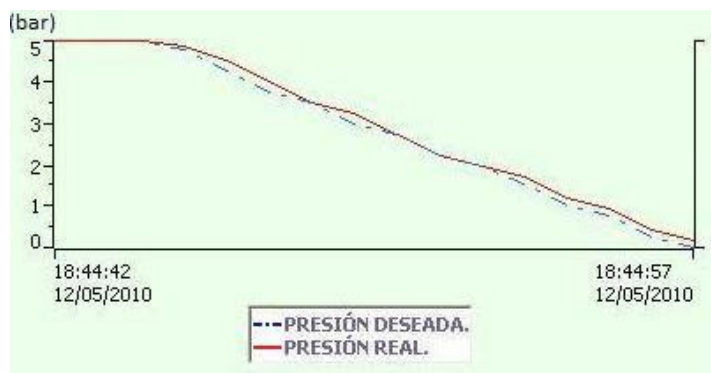


Figura 6.13: Comportamiento en la disminución de presión.

Se puede comprobar que el sistema se adapta rápidamente a estas variaciones en bajada.

Por último, se someterá al sistema a una serie de variaciones bruscas tanto de subida como de bajada para demostrar que el regulador es capaz de adaptar la presión a todos estos violentos cambios.

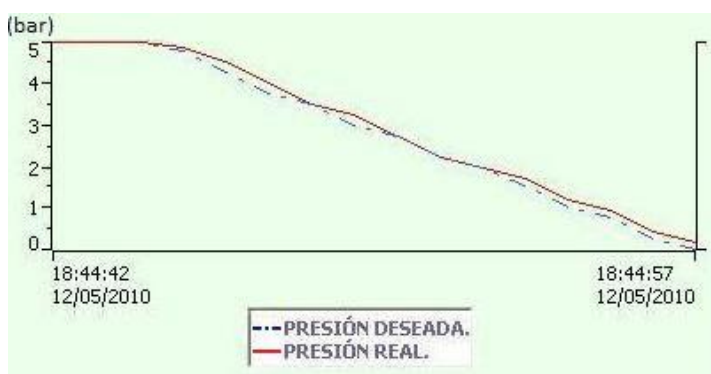


Figura 6.14: Comportamiento ante cambios bruscos.

Observando la gráfica de la Figura 6.14 se puede afirmar que tras un breve periodo de respuesta el sistema se adecua a cualquier variación de presión, adaptándose a una variación de bajada tras una fuerte subida y viceversa.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. Conclusiones

El objetivo general del proyecto era realizar un sistema SCADA que permitiese la comunicación entre el usuario y el sistema, de tal forma que pudiese supervisar y controlar la presión a través de un panel de operador visualizado en el monitor de un ordenador.

En primer lugar se diseñó y se realizó el montaje del circuito neumático, el cual no supuso una gran dificultad ya que consta de pocos elementos y es relativamente sencillo.

Una vez constituido el circuito neumático, se fue desarrollando de manera paralela la parte del control y del sistema SCADA, lo que suponía que se debía ir coordinando esta parte del proyecto con la parte del control. Este aspecto dificultó en algunos momentos la realización del proyecto, ya que en algunos casos una de las dos partes se adelantaba respecto a la otra e implicaba trabajar sin conocer por completo aspectos de lo que se iba desarrollando paralelamente.

Se disponía de una total libertad para el diseño del panel de operador, por lo que, pese a una primera planificación, el panel sufrió algunos cambios y se le fueron añadiendo elementos que en un primer lugar no estaban programados.

El trabajo desarrollado en este proyecto, pese a ser muy específico y estar englobado en el uso de tecnología neumática, permite desarrollar conocimientos muy generalistas sobre las técnicas utilizadas actualmente para llevar a cabo proyectos de control de procesos industriales, bancos de pruebas y plantas industriales.

Desde un primer momento se tenía claro que la regulación se debía realizar mediante un PID, pero se desconocía cómo programarla en el autómatas. Esta información se obtuvo de diferentes manuales, sobretodo de los que pone a disposición del usuario la casa Siemens.

A lo largo de la carrera se aprenden los usos de la automatización industrial y se aprende a abordar proyectos sencillos de automatización, pero no se profundiza, salvo

algunas excepciones, en el desarrollo de proyectos SCADA. El centrar el proyecto en un sistema HMI me ha permitido tomar contacto con esta parte de la automatización y aprender a manejar un programa hasta el momento desconocido para mí, como lo era WinCC Flexible. De la misma forma, se desconocía cómo integrar los proyectos creados con esta herramienta con la programación en Step 7, así como la modificación en el aspecto Hardware del mismo.

Así mismo, los reguladores PID se estudian en profundidad en diversas asignaturas relacionadas con la ingeniería de control y sistemas y se aprende a implementar su uso en programas como Matlab Simulink que tienen un lenguaje esencialmente matemático, pero no se desarrolla su implementación a nivel de lenguaje de instrucciones o contactos.

Igualmente se estudia el lenguaje de programación sin entrar en detalle sobre la existencia de bloques de funciones que permiten realizar estas funciones de regulación PID. Por tanto, ha sido a raíz de este proyecto cuando he tenido conocimiento de la existencia de estos bloques de funciones que amplían tan enormemente las ventajas de trabajar con autómatas.

7.2. Trabajos futuros

Como futuro desarrollo siguiendo la línea del proyecto, se proponen una serie de ampliaciones destinadas a mejorar el presente trabajo.

La primera de ellas es la traducción del panel a otros idiomas y que estos puedan ser elegidos por el usuario al comienzo.

Otra mejora sería desarrollar un visualizador de curvas mejor que el facilitado por WinCC Flexible, ya que este visualizador no tiene un buen tiempo de respuesta y no se aprecian todo lo bien que debieran las reacciones del sistema ante los cambios. Los objetos nuevos destinados a ser utilizados en WinCC Flexible deben ser creados con el lenguaje Visual Basic Script.

Además, se podría desarrollar un sistema que fuese capaz de detectar fugas en el circuito neumático realizando un cálculo diferencial del flujo entre dos puntos de la instalación como podrían ser a la salida del filtro regulador y en la entrada del acumulador neumático, teniendo siempre en cuenta la cantidad de aire que se expulsa al vacío. Si se detectase cualquier tipo de fuga el sistema debería avisar al usuario y si fuese preciso incluso detener la entrada de aire mediante una válvula de simple efecto normalmente cerrada colocada a la entrada de aire del circuito.

Para realizar el proyecto el departamento nos proporcionó además del material neumático, un ordenador y un PLC compuesto por una fuente de alimentación, una CPU y tarjetas de entradas y salidas tanto analógicas como digitales. Sin embargo, todo este hardware se podría reducir a un menor número de tarjetas de entradas y salidas, además de poder prescindir de la CPU (el elemento más costoso) del PLC utilizando un software que emule esta CPU en el ordenador utilizando los recursos del mismo.

Por otro lado, se podría dar una nueva funcionalidad al sistema de adquisición de datos, dotar al equipo de la posibilidad de almacenar los valores de presión y eventos producidos con un muestreo de 1 segundo y que fuesen almacenados en una tabla Excel para su posterior supervisión. Junto a este desarrollo se propone la posibilidad de desarrollar el sistema utilizando la herramienta LabView, que permite una mayor potencia en lo que se refiere a adquisición de datos y análisis matemático.

Glosario

AWL	Listas de instrucciones
FUP	Funciones de bloques lógicos
HMI	Human-Machine Interface
IED	Intelligent Electronic Device
KOP	Programa de contactos
MMI	Man-Machine Interface
MTU	Master Terminal Unit
OLE	Objet Linking and Embedding
OPC	OLE for Process Control
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLC	Programmable Logic Controller
RTU	Remote Terminal Unit
SAMR	Sistemas Adaptativos con modelo de referencia
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol

Bibliografía

- [1] <http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/IntroduccionI.htm>,
accedido en Febrero 2010.
- [2] Jaume Romagosa Cabús, David Gallego Navarrete, Raúl Pacheco Porras:
“Sistemas Scada”. Universitat Politècnica de Catalunya. 2004.
- [3] Rodríguez Penin, Aquilino. “Sistemas SCADA”. (2da. edición. Marcombo
ediciones técnicas, 2007).
- [4] <http://www.festo-didactic.com/es-es/>, accedido en Marzo 2010.
- [5] <http://support.automation.siemens.com>, accedido en Febrero 2010.
- [6] UNE-EN 61310-1: “Seguridad de las máquinas. Indicación, marcado y
maniobra. Parte 1: Especificaciones para las señales visuales, audibles y
táctiles”. Julio 2008.
- [7] Simatic WinCC Flexible 2008 Advanced.
- [8] Dagoberto Montero, Davida Barrantes, Jorge Quirós. “Introducción a
sistemas de control supervisor y de adquisición de datos (SCADA)”.
Universidad de Costa Rica. 2004
- [9] <http://www.asus.es>, accedido en Mayo 2010.
- [10] <http://www.aceronline.es>, accedido en Mayo 2010.
- [11] [http://www.uco.es/investiga/grupos/eatco/automatica/ihtm/descargar/
scada.pdf](http://www.uco.es/investiga/grupos/eatco/automatica/ihtm/descargar/scada.pdf), accedido en Marzo 2010.
- [12] [http://www.infoplcn.net/Documentacion/Docu_SCADA/infoPLC_net_INF
ORME_SCADA_AI.html](http://www.infoplcn.net/Documentacion/Docu_SCADA/infoPLC_net_INF
ORME_SCADA_AI.html), accedido en Marzo 2010.

- [13] http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/es/brochure_simatic-wincc_es.pdf, accedido en Abril 2010.
- [14] Simatic Step 7 v4.3
- [15] Siemens, Simatic: Manual para configurar el hardware y la comunicación con STEP 7. (Siemens, 2006)
- [16] Siemens, Simatic HMI: “ WinCC flexible, Getting Started Avanzado. (Siemens, 2008).